



# 第1章 放大电路的建模与分析

## 之3 差分放大与集成运放

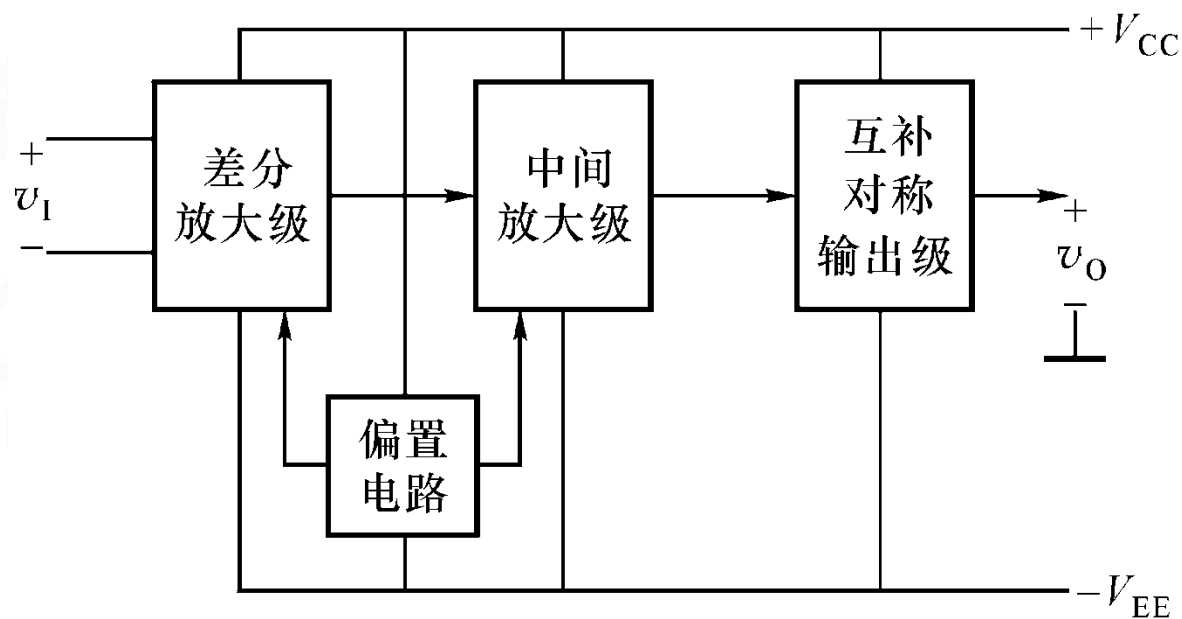
本节主要讨论：

- 电流源电路的电路型式
- 差分放大电路的分析与计算
- 集成运放的组成及内部电路介绍
- 集成运放的特性和性能指标

## 1.8.3 集成运放中的电流源电路 (77页)

集成运算放大器是通过半导体集成工艺制成的一种**高增益直接耦合式**多级放大器。由于它最早应用于模拟信号运算，因而得名并沿用至今。

### ✧ 集成运放的典型结构



✧ 输入级采用差分放大电路 ➡

低温漂，高共模抑制比和高输入电阻

✧ 中间级采用CE(CS)电路 ➡

高电压增益

✧ 输出级采用互补对称式射极跟随器结构 ➡

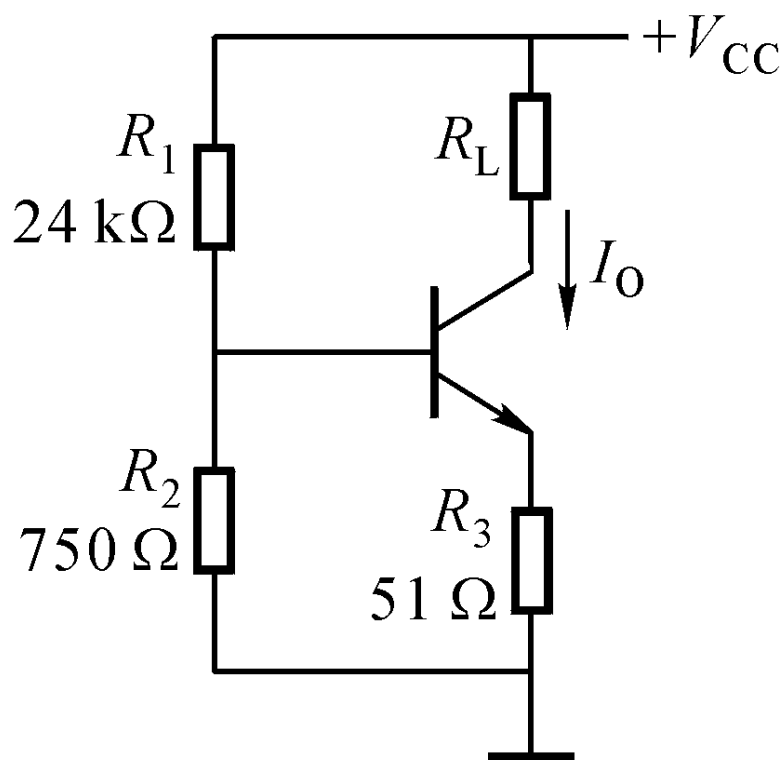
低输出电阻，较强带负载能力

✧ 偏置电路采用电流源电路 ➡

工作电流小，交流等效大电阻

## 一、单管构成的电流源电路

### ➤ 三极管组成的电流源电路



电路特点：

负载串联在集电极回路上

基极偏置电压恒定

集电极输出稳定的电流

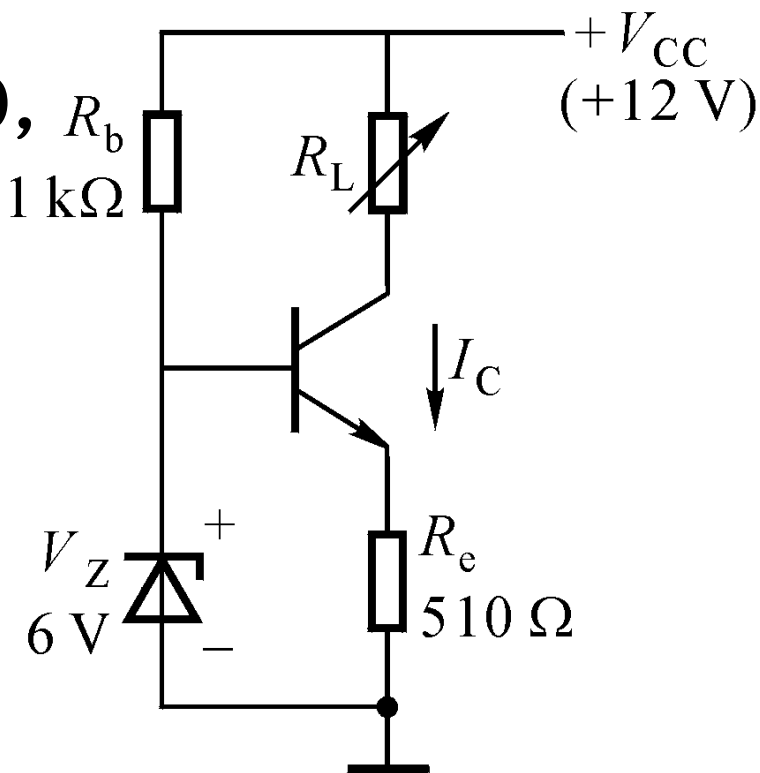
当  $R_e = 0$  时,  $R_o \approx r_{ce}$

当  $R_e \gg r_{be}$  时,  $R_o \approx \beta r_{ce}$

## 【例】单管电流源电路

由三极管构成的电流源电路如图所示。设三极管的 $\beta=50$ ,  $R_b=1\text{ k}\Omega$ ,  $r_{ce}=50\text{ k}\Omega$ ,  $r_{bb'}=100\Omega$ 。

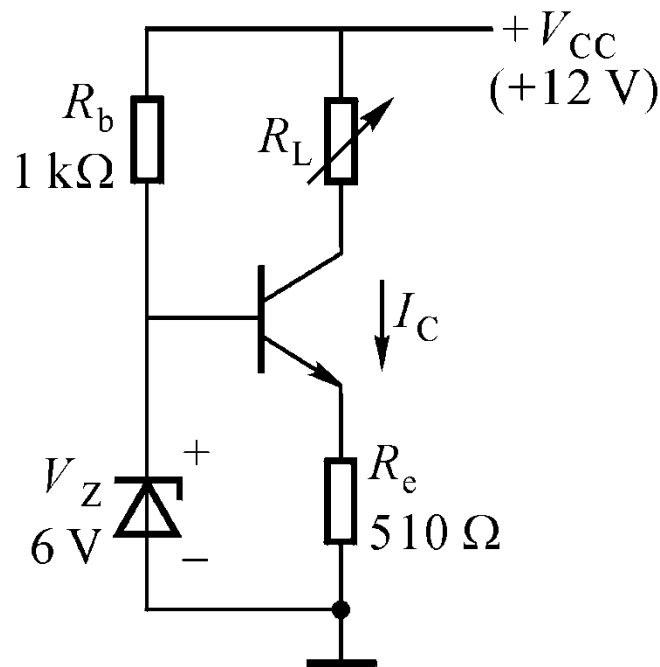
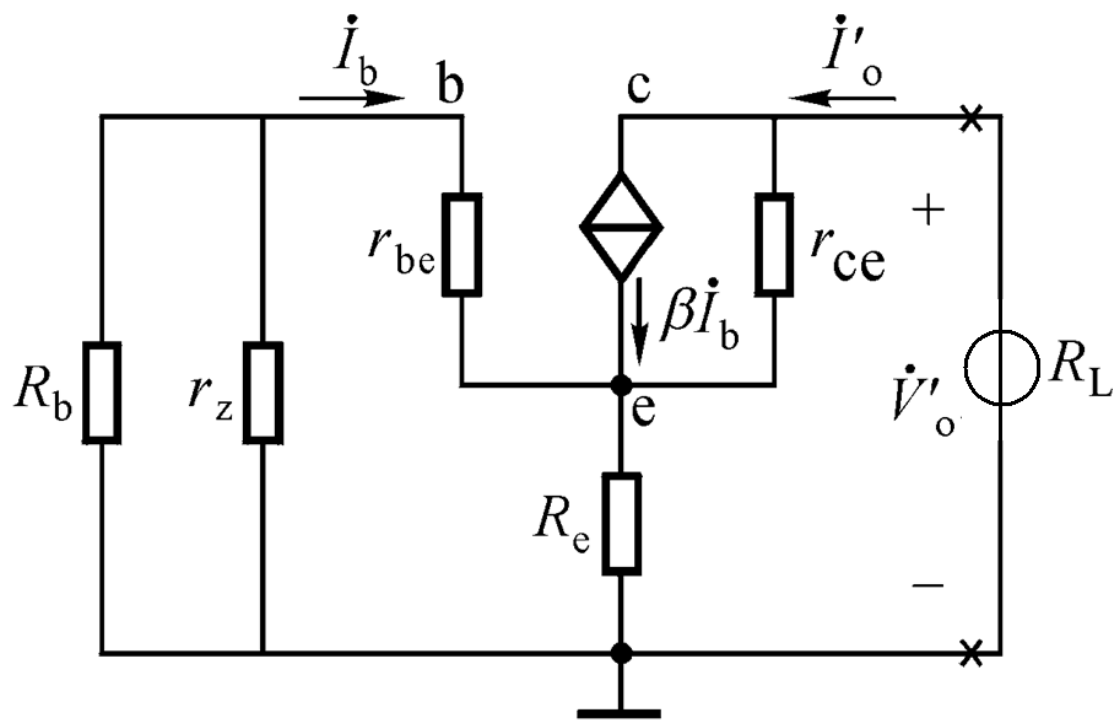
- (1) 写出 $I_C$ 与 $V_Z$ 的关系式;
- (2) 计算电流源的输出电阻 $R_o$ ;
- (3) 分析当负载电阻 $R_L$ 改变时, 电流源的静态工作条件。



【解】

$$(1) \quad I_C = I_{CQ} = \frac{V_Z - 0.7V}{R_e} \\ = \frac{6 - 0.7}{0.51} = 10.4 \text{ mA}$$

(2) 计算 $R_o$ : 先画微变等效电路。



$r_{ce}$  通常可忽略(即认为 $r_{ce} = \infty$ ), 这里为什么要考虑?

$$\dot{I}_b(r_{be} + R_b // r_z) + (\dot{I}_o' + \dot{I}_b)R_e = 0$$

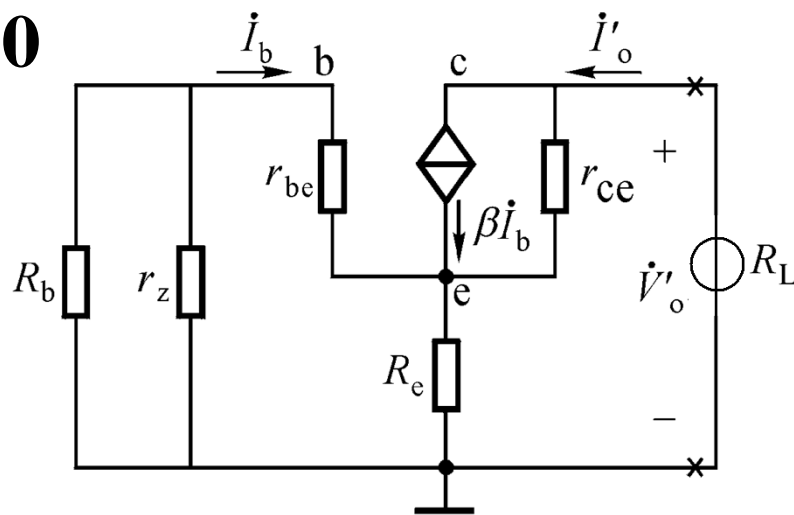
$$(\dot{I}_o' - \beta \dot{I}_b)r_{ce} + (\dot{I}_o' + \dot{I}_b)R_e = \dot{V}_o'$$

$$\dot{I}_b = -\frac{R_e}{r_{be} + R_e + R_b // r_z} \dot{I}_o'$$

$$(\dot{I}_o' + \beta \frac{R_e}{r_{be} + R_e + R_b // r_z} \dot{I}_o')r_{ce} + (\dot{I}_o' - \frac{R_e}{r_{be} + R_e + R_b // r_z} \dot{I}_o')R_e = \dot{V}_o'$$

$$R_o = \frac{\dot{V}_o'}{\dot{I}_o'} = \left( 1 + \frac{\beta R_e}{r_{be} + R_e + R_b // r_z} \right) r_{ce} + R_e // (r_{be} + R_b // r_z)$$

$$\approx \left( 1 + \frac{\beta R_e}{r_{be} + R_e} \right) r_{ce}$$



$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26 \text{mV}}{I_{CQ}} = 100 + 51 \times \frac{26}{10.4} \approx 228 \Omega$$

$$R_o = \left( 1 + \frac{\beta R_e}{r_{be} + R_e} \right) r_{ce} = \left( 1 + \frac{50 \times 510}{228 + 510} \right) \times 50 = 1.78 \text{M}\Omega$$

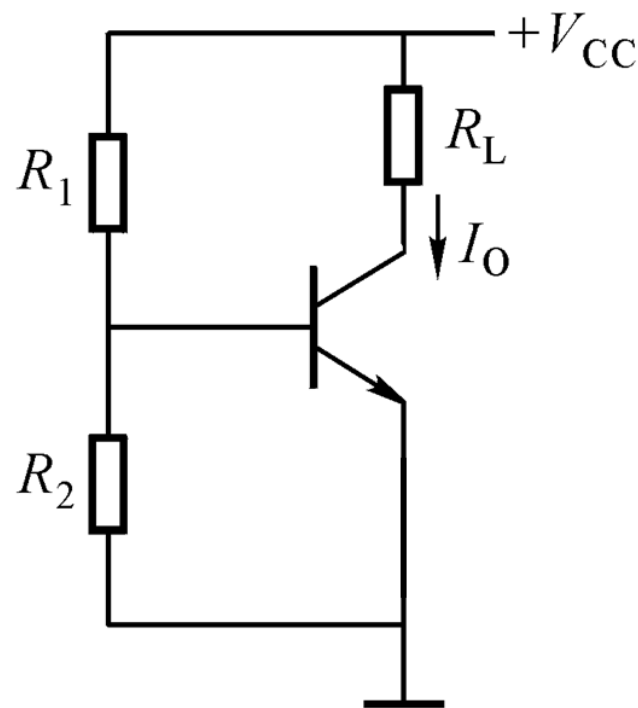
输出电阻很高，说明电路具有较理想的恒流特性。

不接 $R_e$  ( $R_e=0$ ) 时， $R_o$  为多大？

$$R_o \approx r_{ce}$$

当 $R_e \gg r_{be}$  时， $R_o$  为多大？

$$R_o \approx \beta r_{ce}$$

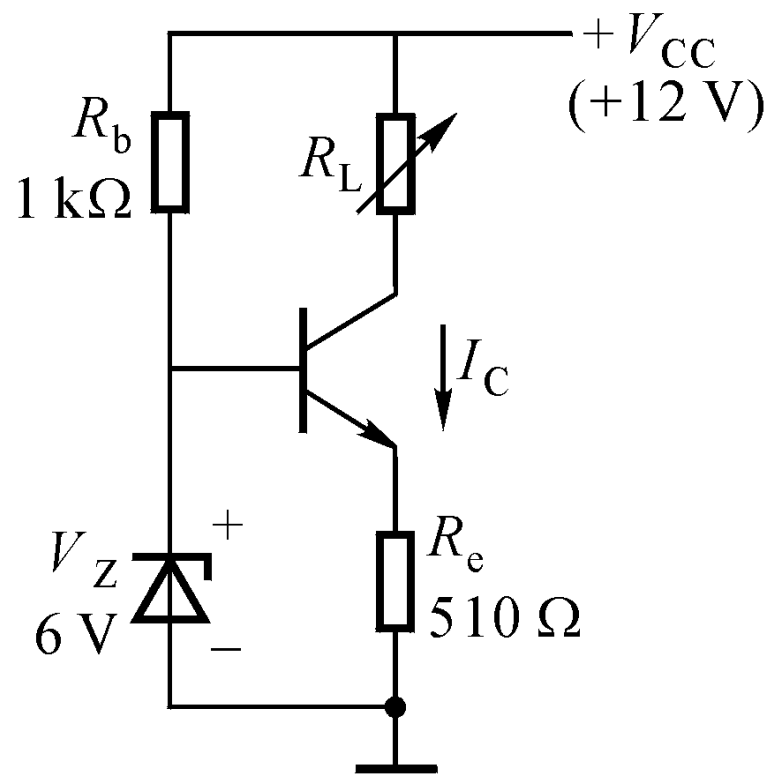




(3) 当负载电阻 $R_L$ 增大到使 $V_{CEQ} < 0.7V$ 时, 晶体管进入饱和区,  $I_{CQ} \neq I_{EQ}$ , 因而 $I_{CQ}$ 无法保持恒流输出。

$$V_{CEQ} \approx V_{CC} - (R_e + R_L)I_{CQ} \geq 0.7V$$

$$\begin{aligned} R_L &\leq \frac{V_{CC} - 0.7}{I_{CQ}} - R_e \\ &= \frac{12 - 0.7}{10.4} - 0.51 \\ &\approx 0.576k\Omega \end{aligned}$$

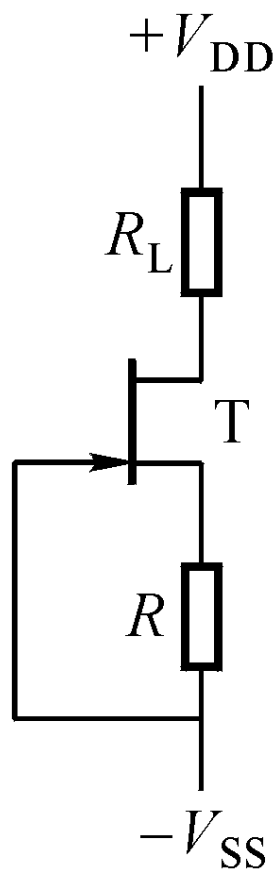


该恒流源电路仅允许负载 $R_L$ 在 $0 \sim 576\Omega$ 之间变化。

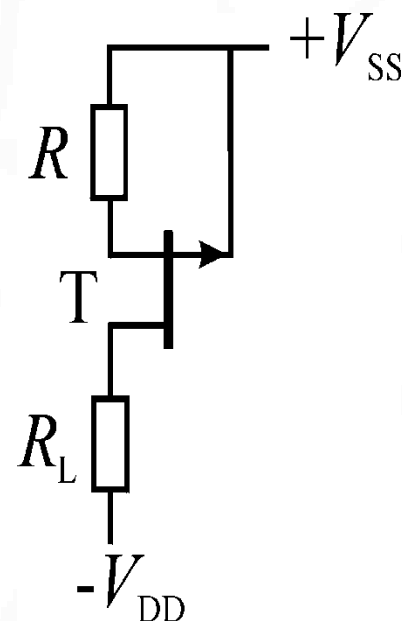


## ➤ 场效应管组成的电流源电路

### ■ N沟道JFET



### ■ P沟道JFET



电路特点：

负载串联在漏极回路上

栅极偏置电压恒定

漏极输出稳定的电流

## ➤ 小结与讨论：单管组成的电流源电路

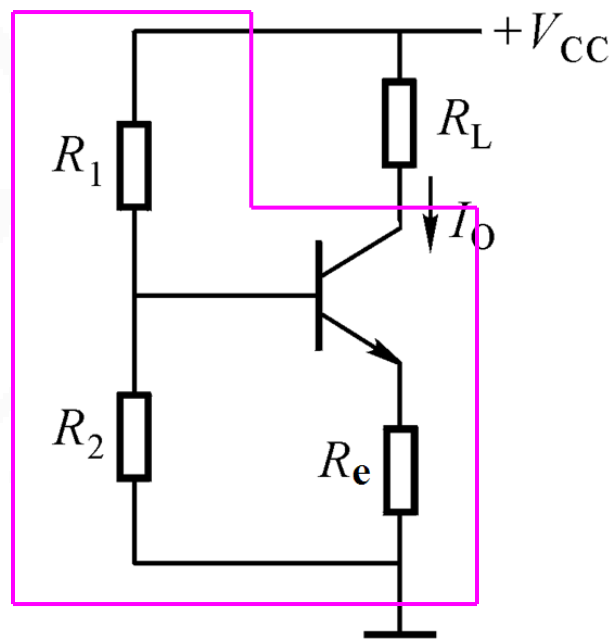
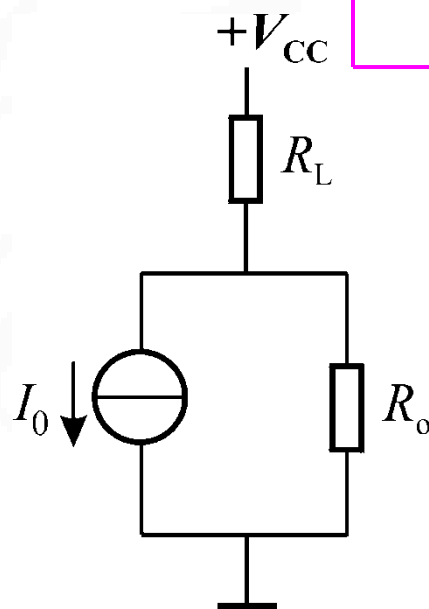
### ✧ 单管组成的电流源电路特点：

- ① 负载串接在集电极上；
- ② 输入电压恒定(单口网络)；
- ③ 发射极串接电阻稳定 $Q$ 点。

### ✧ 电流源等效电路：

### ✧ 电流源作用：

- 提供恒流偏置
- 作为有源负载(大阻值动态电阻)



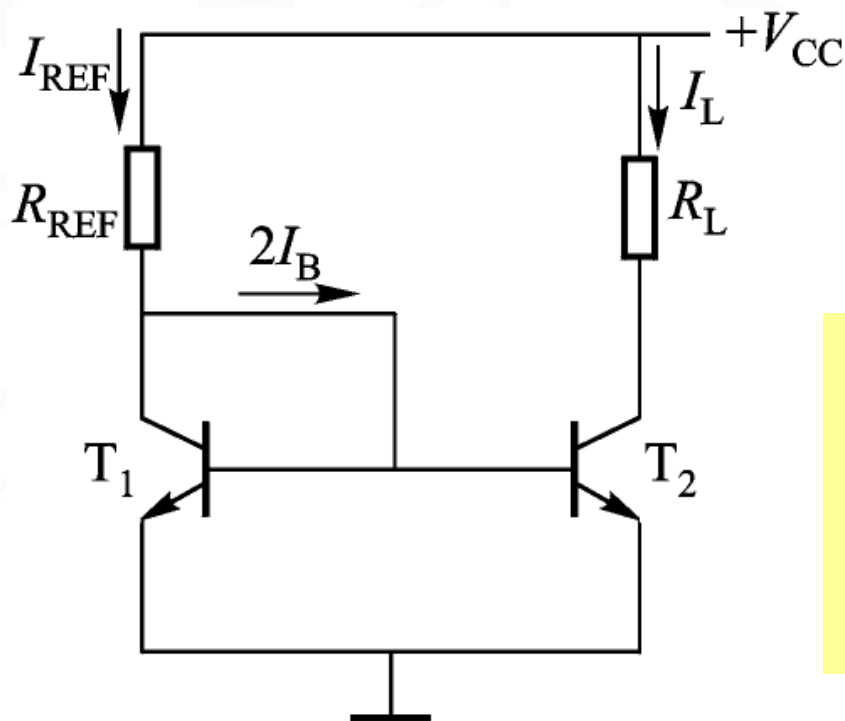
当  $R_e = 0$  时,

$$R_o \approx r_{ce}$$

当  $R_e \gg r_{be}$  时,

$$R_o \approx \beta r_{ce}$$

## 二、基本镜像电流源电路



(1)  $T_1$ 管工作在什么状态？

(2) 电路的 $R_o=?$

- ✧ 由两只特性完全相同的三极管组成。
- ✧ 电阻 $R_{REF}$ 确定参考电流 $I_{REF}$ 。
- ✧  $I_{C2} = I_{C1} \approx I_{REF}$ ，因此称为镜像电流源或电流镜电路。

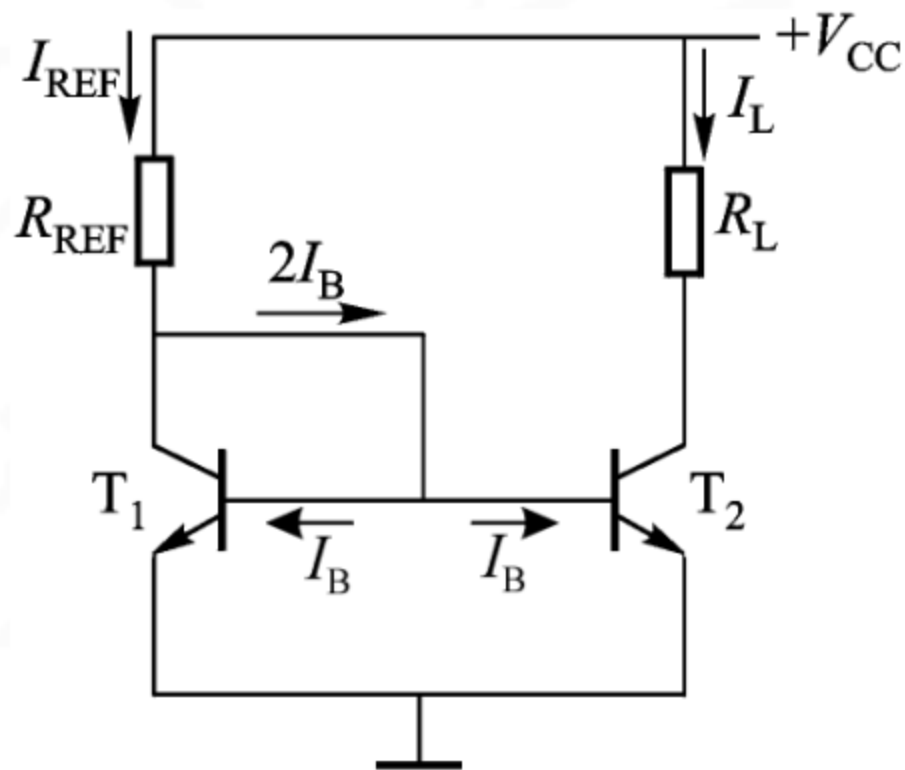
## ➤ 输出电流的精确计算

$$I_B = I_{B1} = I_{B2} = \frac{1}{1+\beta} I_E$$

$$I_C = I_{C1} = I_{C2} = \frac{\beta}{1+\beta} I_E$$

$$I_{REF} = I_C + 2I_B = \frac{\beta+2}{1+\beta} I_E$$

$$I_L = I_C = \frac{\beta}{1+\beta} I_E = \frac{\beta}{1+\beta} \cdot \frac{1+\beta}{\beta+2} I_{REF} = \frac{1}{1+2/\beta} I_{REF}$$

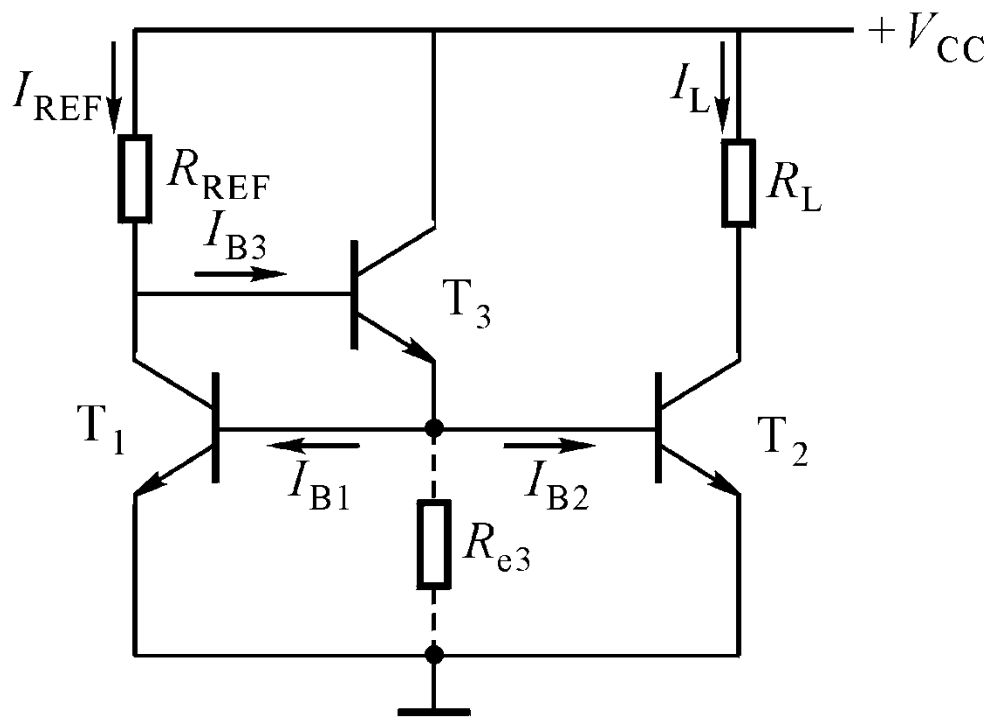


✧ 误差为  $2I_B$ ，相对误差通常小于5%。

### 三、跟随型镜像电流源电路

✧ 在基本镜像电流源电路的基础上增加  $T_3$  管，输出电流与参考电流仍然有“镜像”关系。

$$\begin{aligned} I_L &= I_{C2} = I_{C1} \approx I_{REF} \\ &= \frac{V_{CC} - 2V_{BE}}{R_{REF}} \approx \frac{V_{CC}}{R_{REF}} \end{aligned}$$

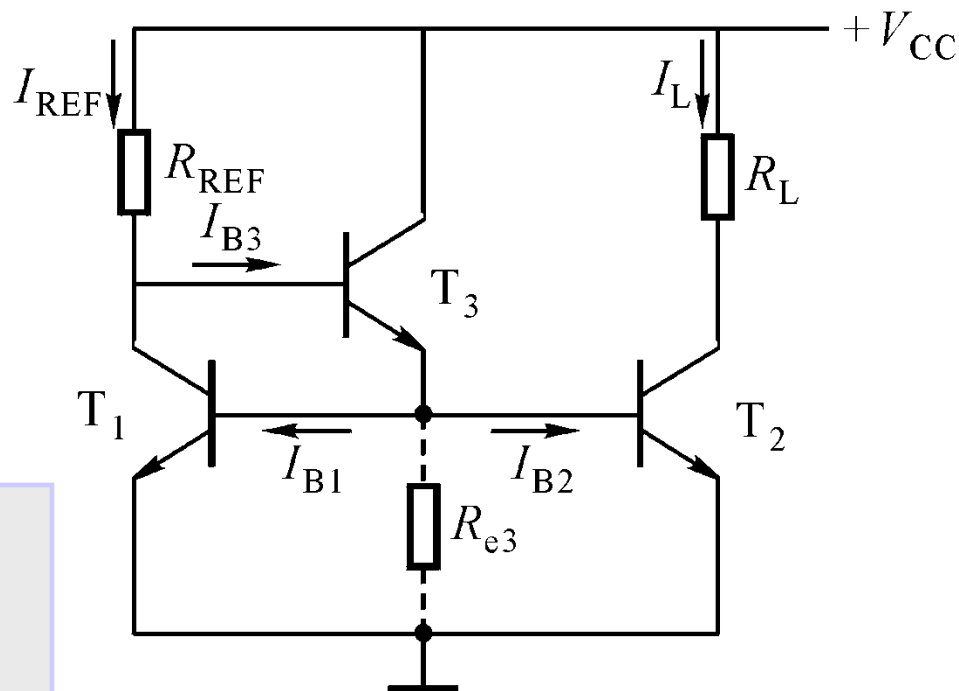


✧  $T_3$  管的作用是减小输出电流与参考电流的误差。

$$I_{B3} = \frac{I_{E3}}{1 + \beta} = \frac{2I_{B1}}{1 + \beta}$$

$$= \frac{2I_{C1}}{\beta(1 + \beta)}$$

当 $\beta \geq 50$ 时，输出电流 $I_L$ 与参考电流 $I_{REF}$ 的**相对误差小于0.08%**，因此称为**跟随型电流源**。

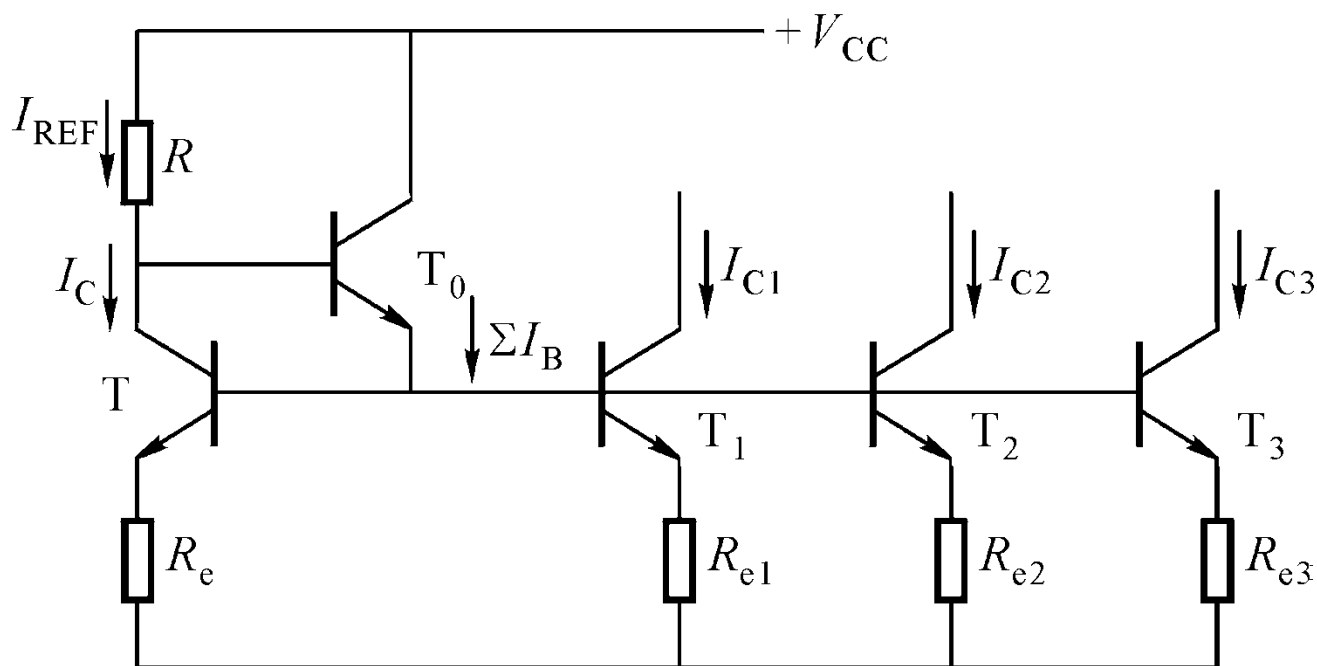


实际应用时常接有 $R_{e3}$ ， $R_{e3}$ 有什么作用？

$R_{e3}$ 可增大 $T_3$ 管工作电流，从而提高 $T_3$ 管的 $\beta$ 。



## 四、多路电流源电路



当参考电流  $I_{REF}$  确定后，在各支路串入不同的射极电阻，得到不同的输出电流。

$$V_{BE} + I_E R_e = V_{BE1} + I_{E1} R_{e1} = V_{BE2} + I_{E2} R_{e2} = V_{BE3} + I_{E3} R_{e3}$$

$$I_E R_e \approx I_{E1} R_{e1} \approx I_{E2} R_{e2} \approx I_{E3} R_{e3}$$

$$I_{REF} R_e \approx I_{C1} R_{e1} \approx I_{C2} R_{e2} \approx I_{C3} R_{e3}$$

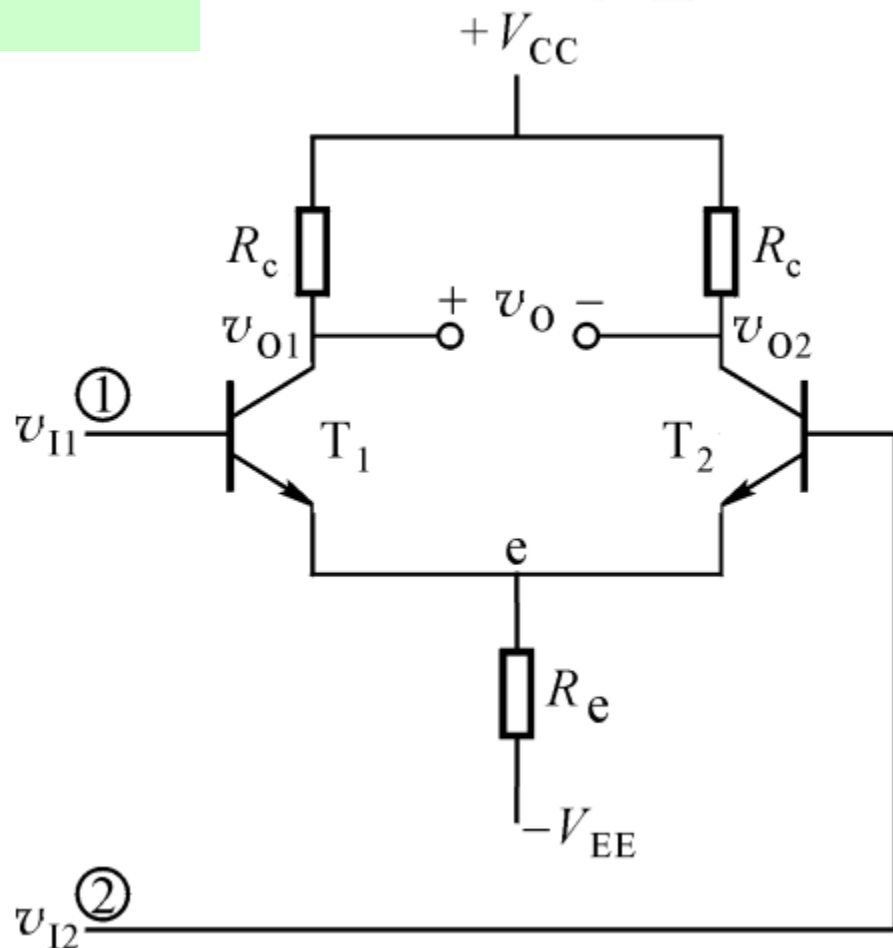




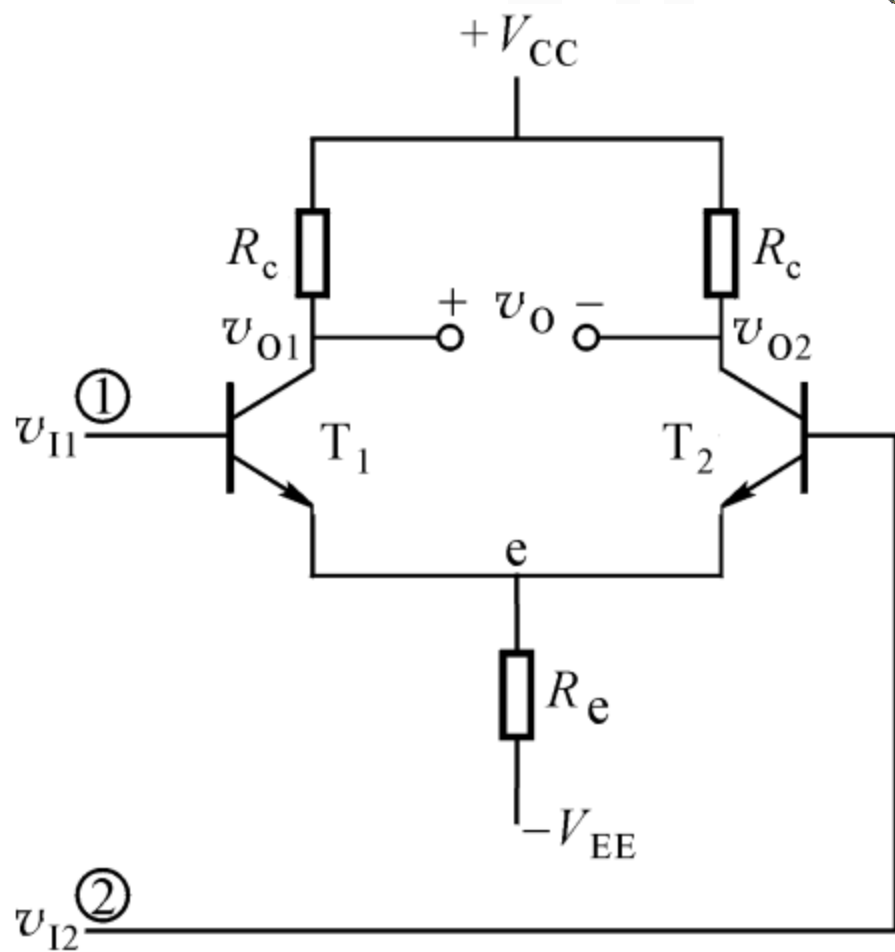
## 1.6 差分放大电路

### 一、基本结构和电路分析

- ✧ 也称为差动放大电路 (differential amplifier)。
- ✧ 由两只特性和参数完全相同的三极管（称为对管）组成对称电路。
- ✧  $T_1$ 、 $T_2$  的发射极连接一个射极电阻，简称长尾式差分放大电路。



- ✧ 电路为直接耦合，既可以输入交流信号，也可以输入**直流变化信号**。
- ✧ 电路有两个输入端，既可以单端输入，也可以双端输入。
- ✧ 电路有两个输出端，既可以单端输出，也可以双端输出。



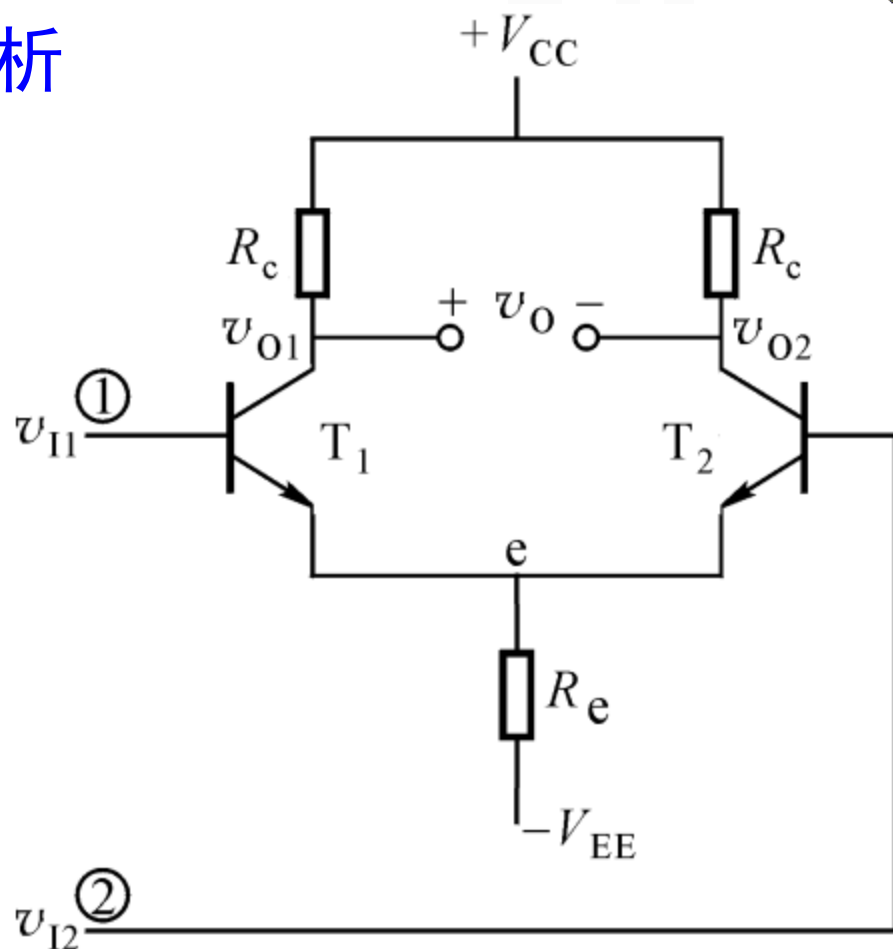
# 1、差分放大电路的静态分析

$$I_{C1} = I_{C2} = I_C$$

$$I_{E1} = I_{E2} = I_E$$

$$V_E = -V_{BE} = -0.7V$$

$$I_C \approx I_E = \frac{V_E - (-V_{EE})}{2R_e}$$
$$= \frac{V_{EE} - 0.7}{2R_e}$$



差分放大电路的静态偏置电流由电源 $-V_{EE}$ 提供，调整 $R_e$ 可以方便地改变静态电流的大小。

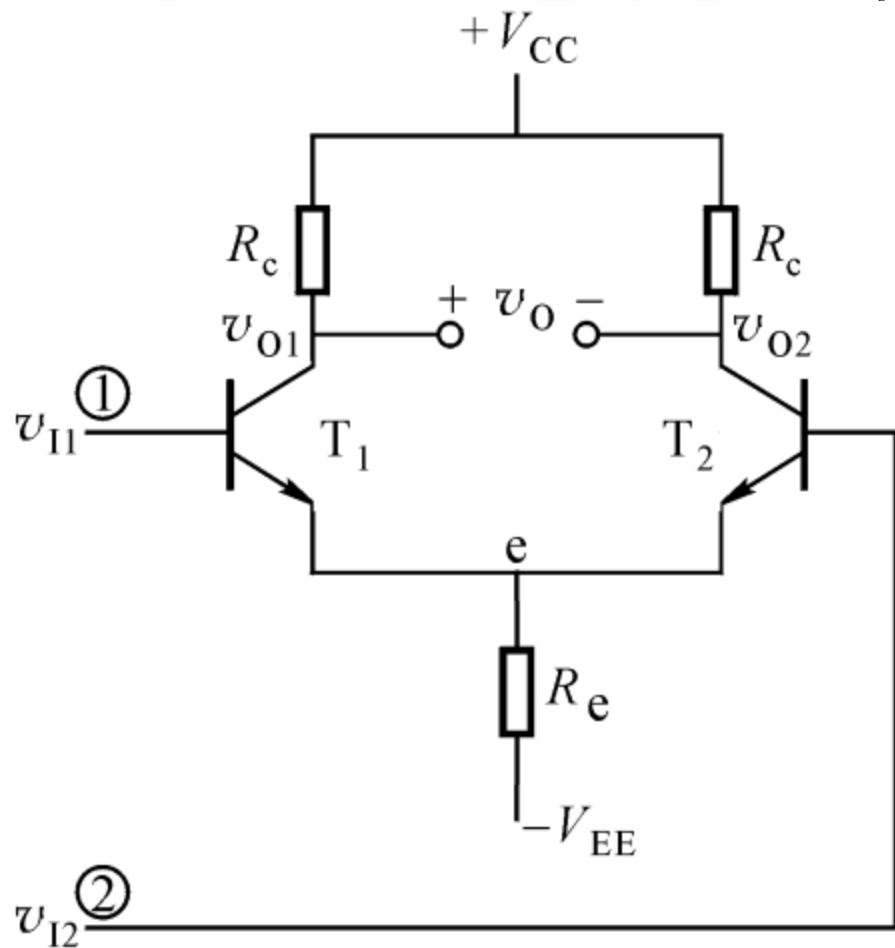
$$V_{O1Q} = V_{O2Q} = V_{CC} - I_{CQ}R_c$$

$$V_{OQ} = V_{O1Q} - V_{O2Q} = 0$$

双端输出时，静态  
输出电压为0；

单端输出时，静态  
输出电压不为0。

由于电路结构对称，  
元件参数和特性相同，  
因而温度变化时， $I_{C1Q}$ 、 $I_{C2Q}$ 始终相等，有效地抑制了温漂和零漂。



若单端输出(如 $v_{O2}$ 端  
输出)， $T_1$ 可不接 $R_c$ 。这  
时 $I_{CQ}$ 和 $V_{CQ}$ 是否相等？

## 2、差分放大电路的动态分析

### ➤ 差模与共模

被测信号的输入方式：

- 单端输入方式
- 双端输入方式（如桥式测量电路）

差模成分：两个输入信号之差。  $\Delta v_{Id} = \Delta v_{I1} - \Delta v_{I2}$

共模成分：两个输入信号平均值。  $\Delta v_{Ic} = \frac{\Delta v_{I1} + \Delta v_{I2}}{2}$

差模成分反映被测信号的变化，需要进一步放大。

共模成分反映测量的初始条件或外界干扰，不但  
不必放大，而且还需要加以抑制。

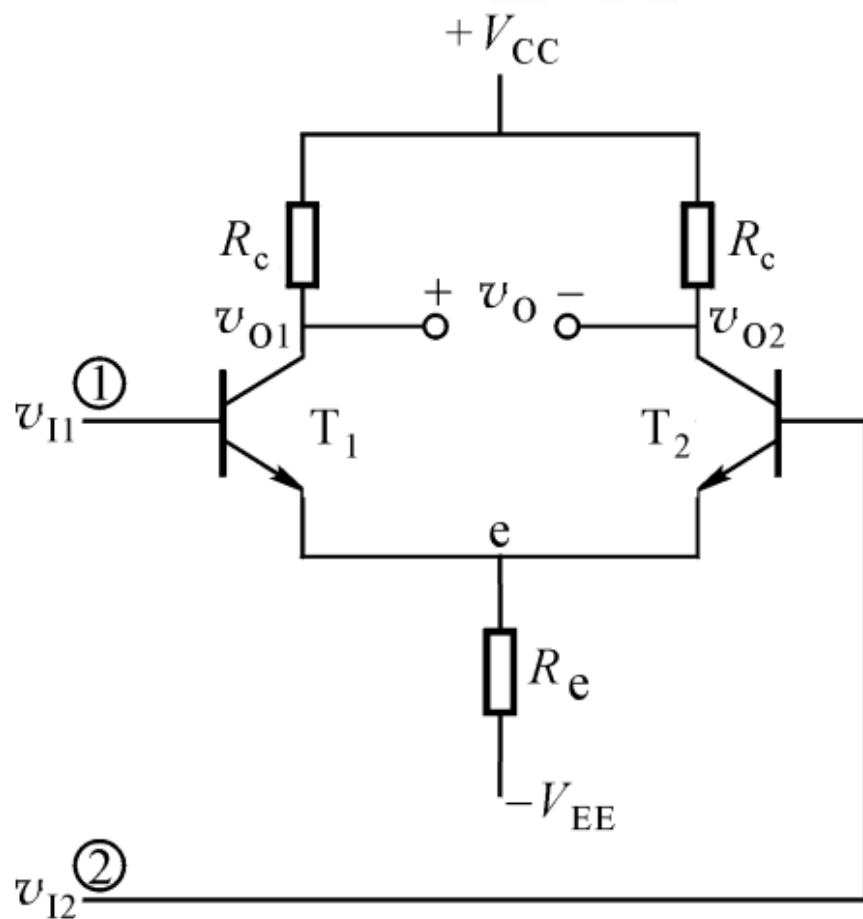
$$\Delta v_{Id} = \Delta v_{I1} - \Delta v_{I2}$$

$$\Delta v_{Ic} = \frac{\Delta v_{I1} + \Delta v_{I2}}{2}$$

差分放大电路的输入  
可以表示为：

$$\Delta v_{I1} = \Delta v_{Ic} + \frac{\Delta v_{Id}}{2}$$

$$\Delta v_{I2} = \Delta v_{Ic} - \frac{\Delta v_{Id}}{2}$$



输入可以等效为共模成分与差模成分的叠加。相应地，输出也应该可以等效为共模与差模的叠加。



$$\Delta v_O = \Delta v_{Od} + \Delta v_{Oc} = A_{vd} \cdot \Delta v_{Id} + A_{vc} \cdot \Delta v_{Ic}$$

**差模输入方式**：只考虑差模输入电压，即差分放大电路的输入端加上两个**幅度相同**  $\Rightarrow A_{vd}$  大而**极性相反**的信号。

**共模输入方式**：只考虑共模输入电压，即差分放大电路的输入端加上两个**极性相同**  $\Rightarrow A_{vc}$  小且**幅度也相同**的信号。

差分放大电路具有对**差模信号**进行放大、对**共模信号**进行抑制的能力。



# 【例1】

已知差分放大电路 $\Delta v_{I1}=5.01\text{V}$ 、 $\Delta v_{I2}=4.99\text{V}$ ， $A_{vd}=-80$ ， $A_{vc}=-0.01$ ，求 $\Delta v_O=?$

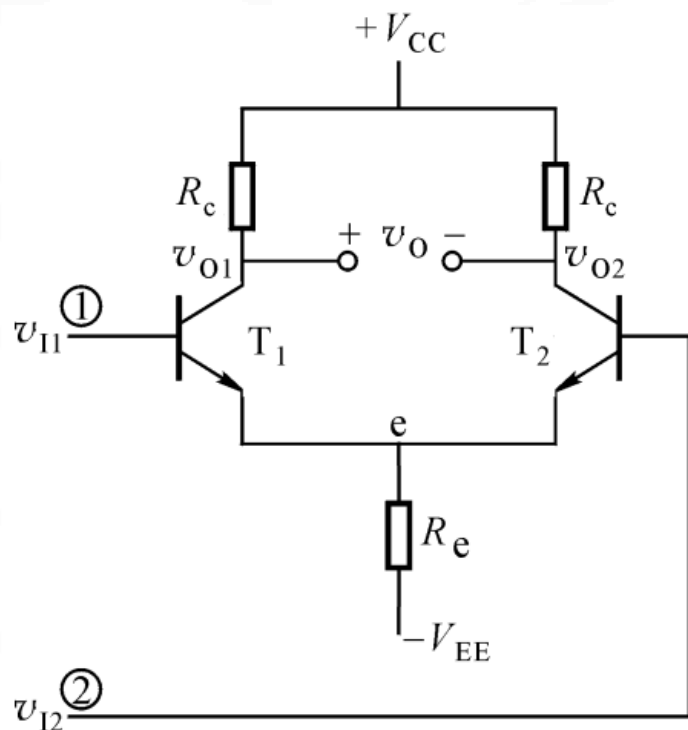
【解】  $\Delta v_{Id} = \Delta v_{I1} - \Delta v_{I2} = 5.01\text{V} - 4.99\text{V} = 0.02\text{V}$

$$\Delta v_{Ic} = \frac{\Delta v_{I1} + \Delta v_{I2}}{2} = \frac{5.01\text{V} + 4.99\text{V}}{2} = 5.0\text{V}$$

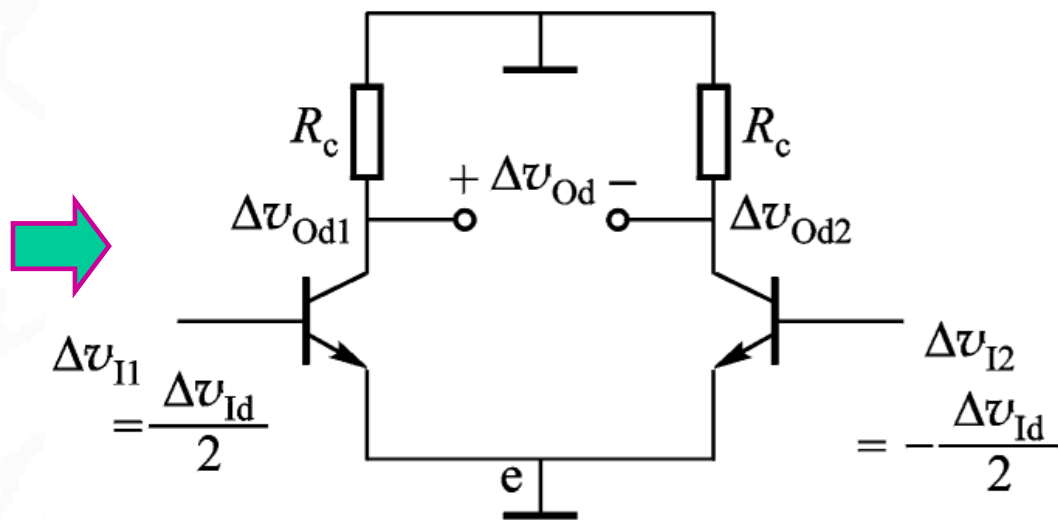
$$\begin{aligned}\Delta v_O &= A_{vd} \cdot \Delta v_{Id} + A_{vc} \cdot \Delta v_{Ic} \\ &= -80 \times 0.02\text{V} + (-0.01) \times 5.0\text{V} \\ &= -1.6\text{V} - 0.05\text{V} \\ &= -1.65\text{V}\end{aligned}$$



## 差模分析



## 差模交流通路



$T_1$ 管增加的 $i_{E1}$ 等于 $T_2$ 管减小的 $i_{E2}$ ，所以流过恒流源的电流保持不变， $\Delta v_E = 0$ ，**e点交流接地**。

$r_{be1} = r_{be2}$ ,  $\Delta i_{E1} = -\Delta i_{E2}$ ,  
 $\Delta i_{R0e} = 0$ ，所以**e点交流接地**。

# ◇ 差模电压放大倍数 $A_{vd}$

$$\Delta v_{I1} = -\Delta v_{I2} = \frac{\Delta v_{Id}}{2}$$

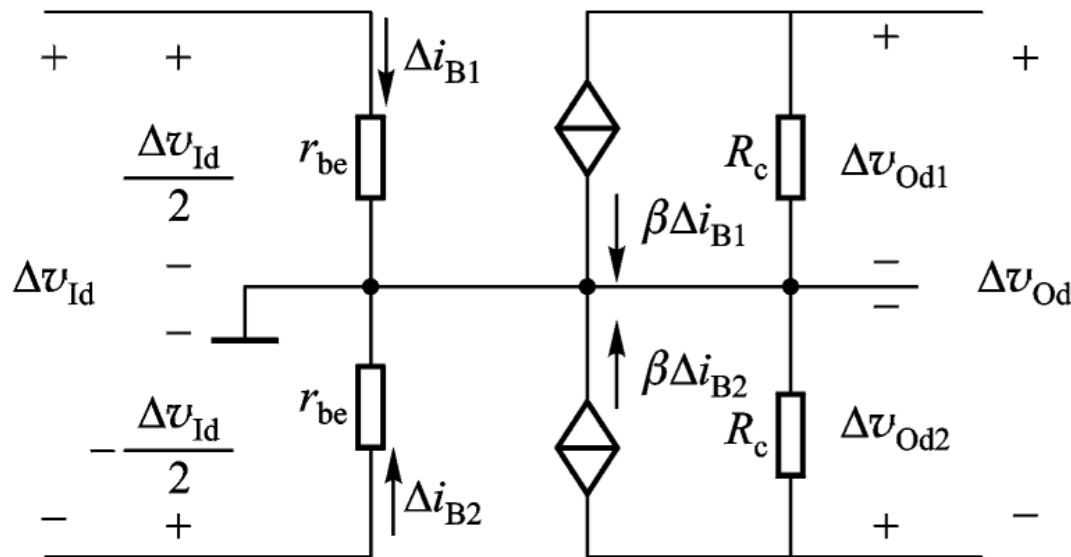
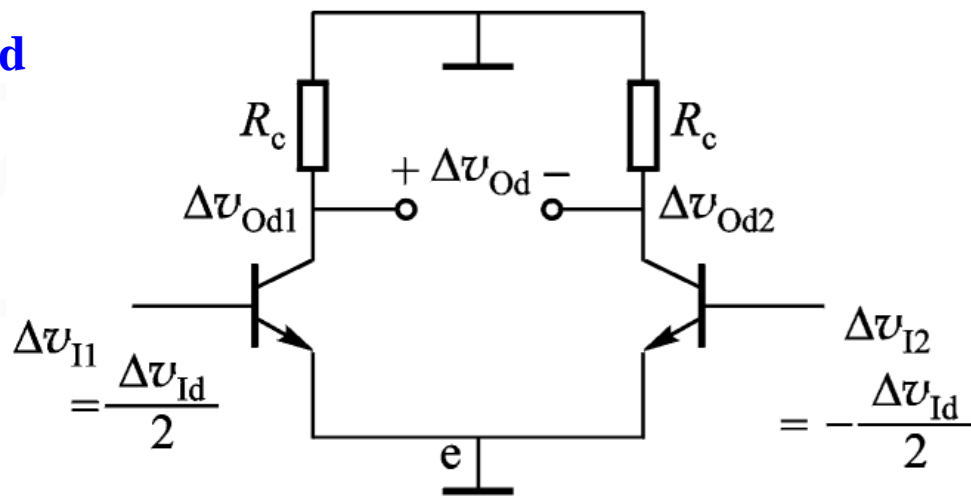
$$\Delta i_{B1} = -\Delta i_{B2} = \frac{\Delta v_{I1}}{r_{be}} = \frac{\Delta v_{Id}}{2r_{be}}$$

$$\Delta v_{Od1} = -\beta \Delta i_{B1} R_c$$

$$\Delta v_{Od2} = -\beta \Delta i_{B2} R_c$$

$$\Delta v_{Od1} = -\Delta v_{Od2}$$

$$\begin{aligned} \Delta v_O &= \Delta v_{Od1} - \Delta v_{Od2} \\ &= 2\Delta v_{Od1} = -2\Delta v_{Od2} \end{aligned}$$

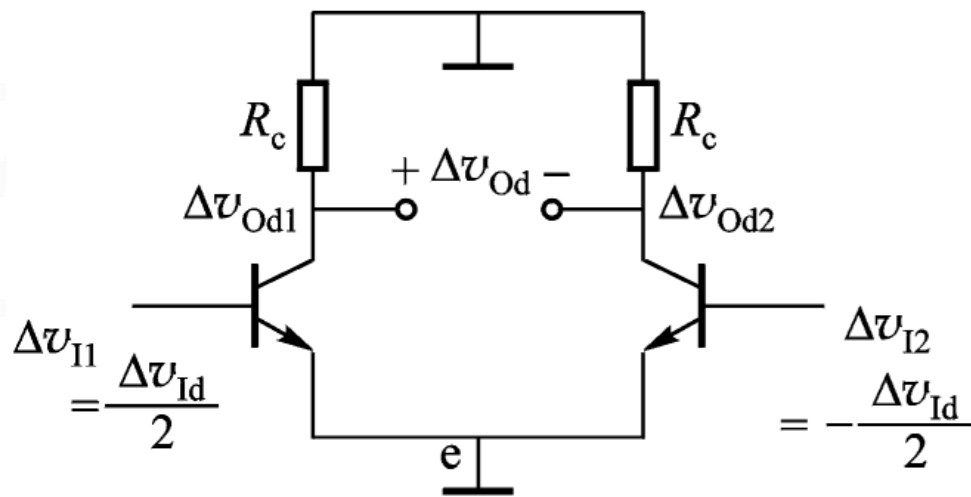


两个输出端上的差模输出电压大小相等而极性相反。

## 双端输出时差模

电压放大倍数为：

$$A_{vd} = \frac{\Delta v_{Od}}{\Delta v_{Id}} = -\frac{\beta R_c}{r_{be}}$$

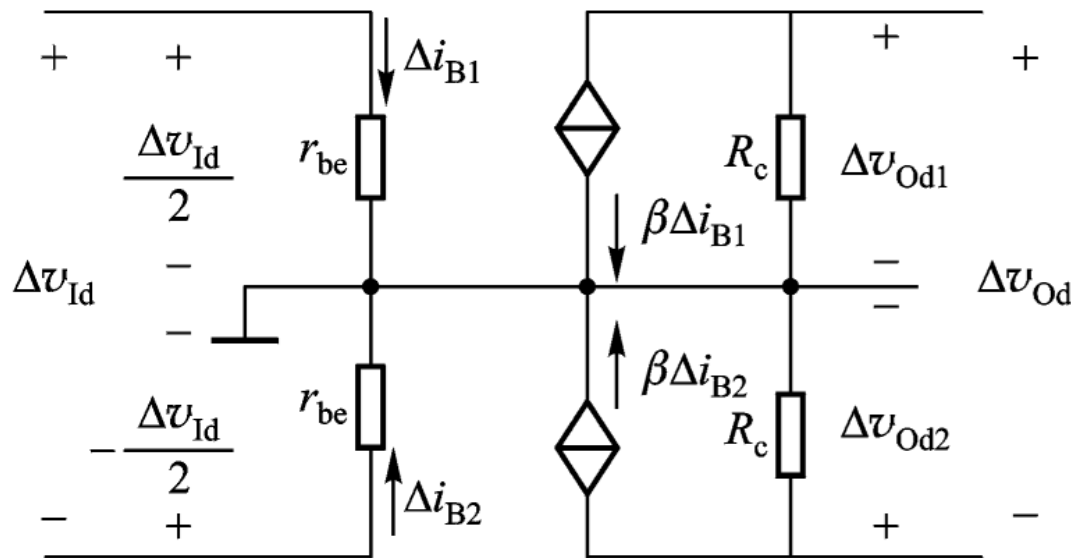


## 单端输出时差模

电压放大倍数为：

$$A_{vd1} = \frac{\Delta v_{Od1}}{\Delta v_{Id}} = -\frac{\beta R_c}{2r_{be}}$$

$$A_{vd2} = \frac{\Delta v_{Od2}}{\Delta v_{Id}} = +\frac{\beta R_c}{2r_{be}}$$



# ✧ 差模输入电阻 $R_{id}$

$$R_{id} = \frac{\Delta v_{Id}}{\Delta i_{Id}} = 2r_{be}$$

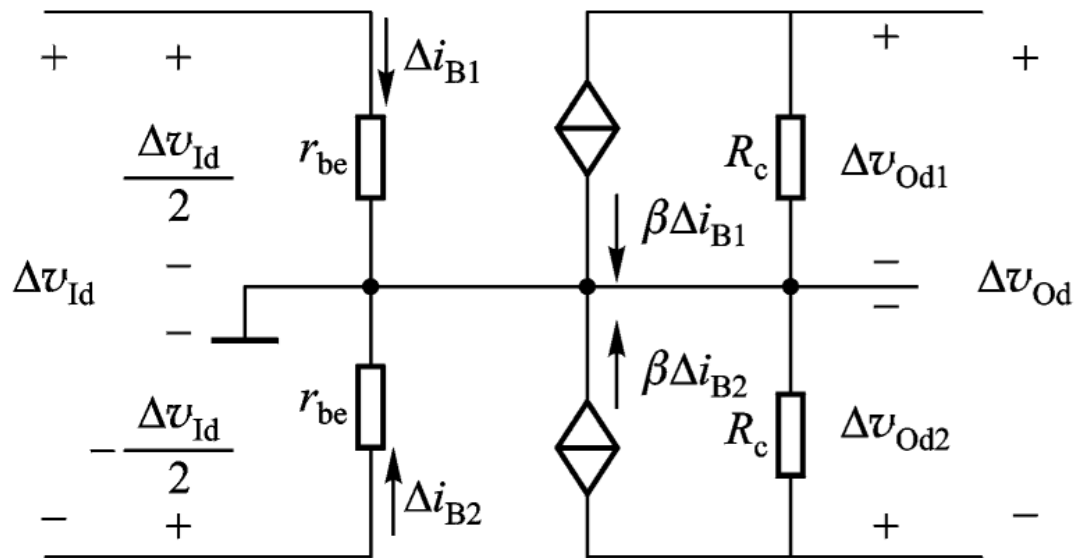
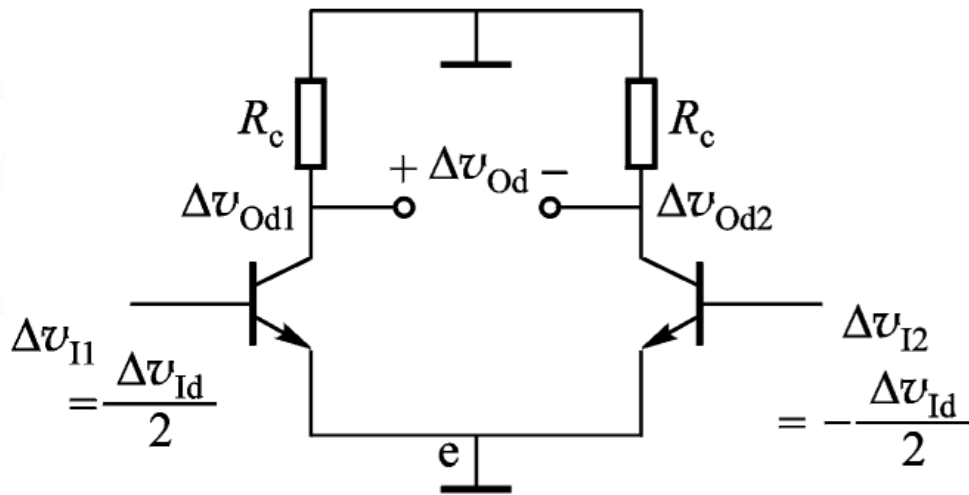
# ✧ 差模输出电阻 $R_o$

双端输出时,

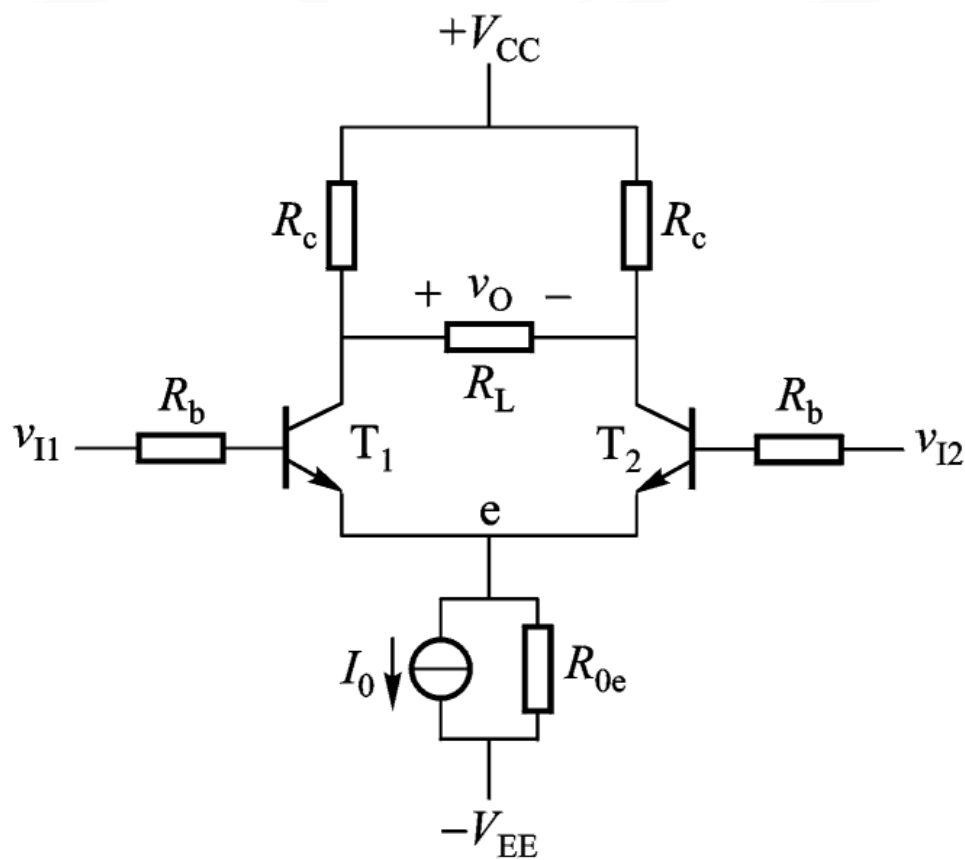
$$R_o = 2R_c$$

单端输出时,

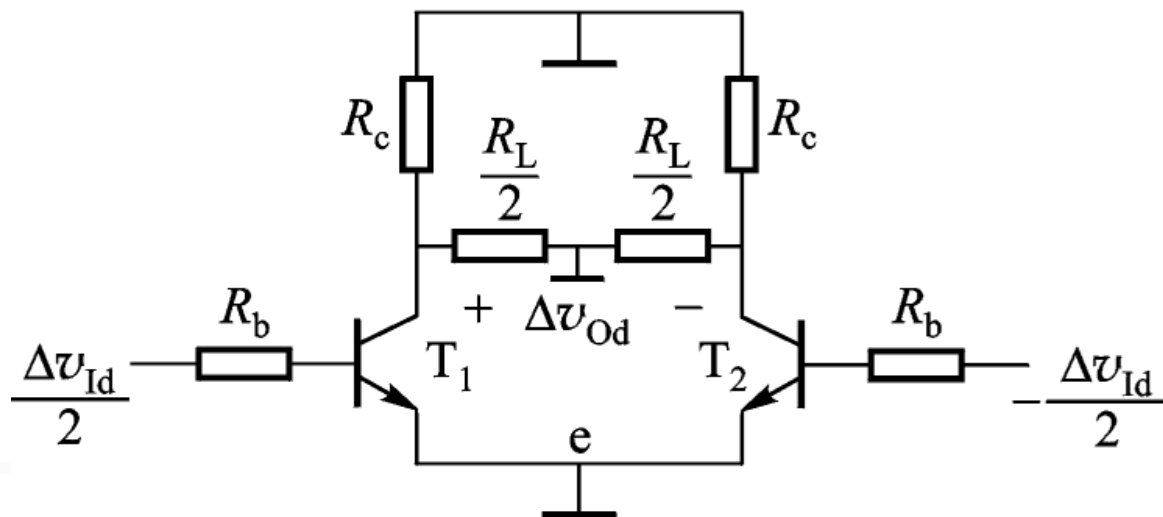
$$R_o = R_c$$



## ✧ 其他电路形式



- 发射极采用恒流源
- 基极串联电阻
- 接负载：负载  $R_L$  的中点交流电位为零，所以为交流接地。

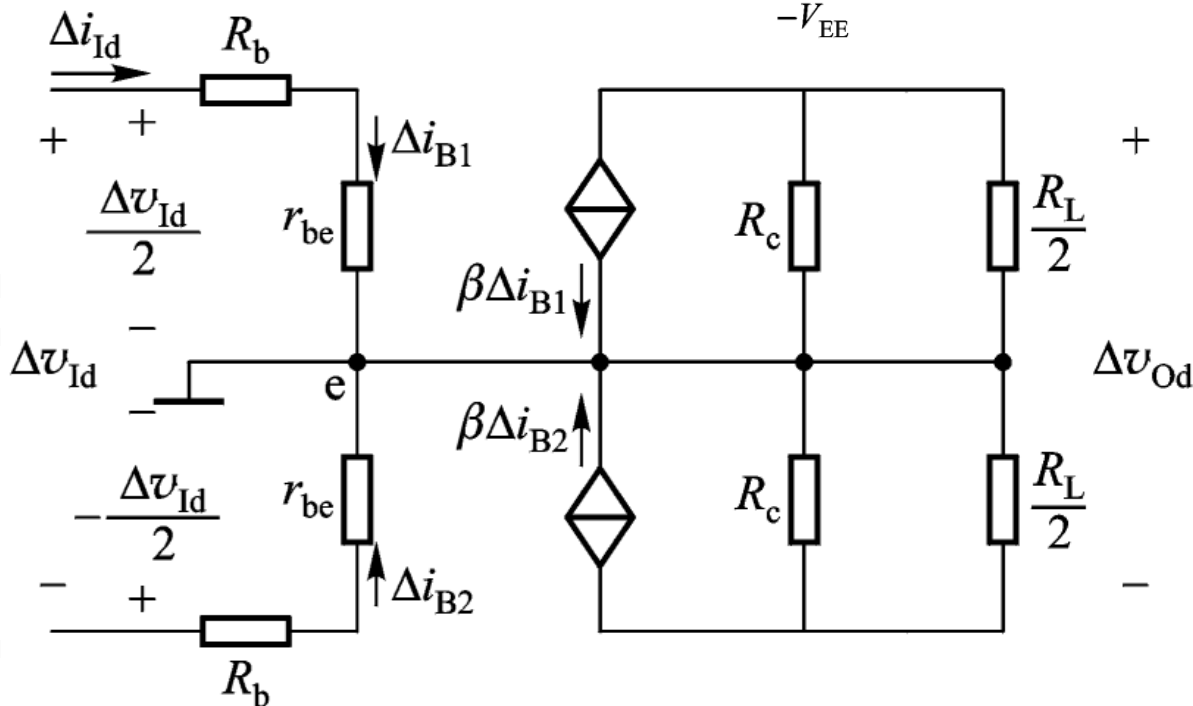
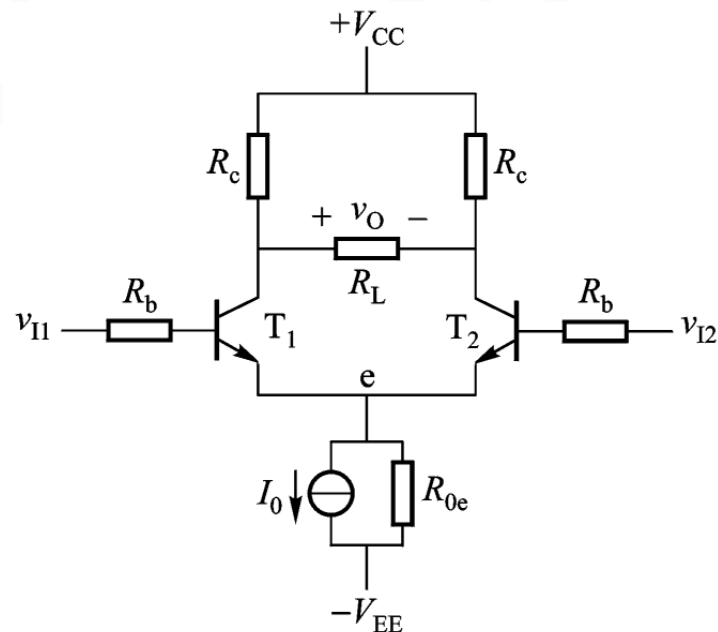


$$A_{vd} = \frac{\Delta v_{Od}}{\Delta v_{Id}} = \frac{-2\beta\Delta i_{B1}\left(R_c \parallel \frac{R_L}{2}\right)}{2\Delta i_{B1}(R_b + r_{be})}$$

$$= -\frac{\beta\left(R_c \parallel \frac{R_L}{2}\right)}{R_b + r_{be}}$$

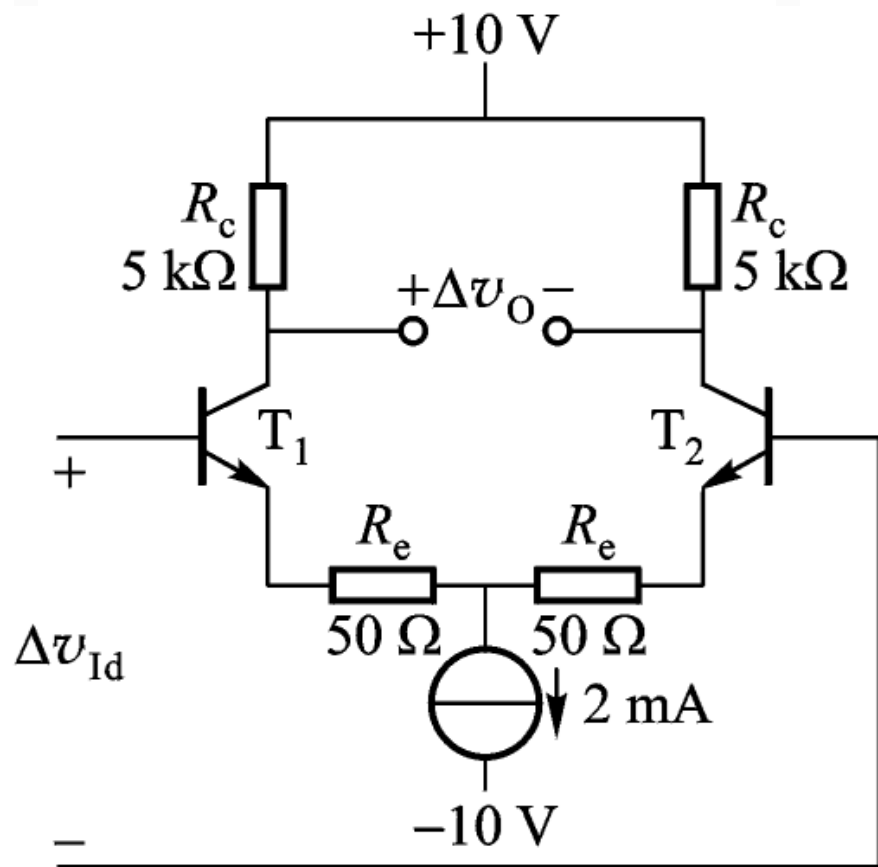
$$R_{id} = 2(R_b + r_{be})$$

$$R_o = 2R_c$$



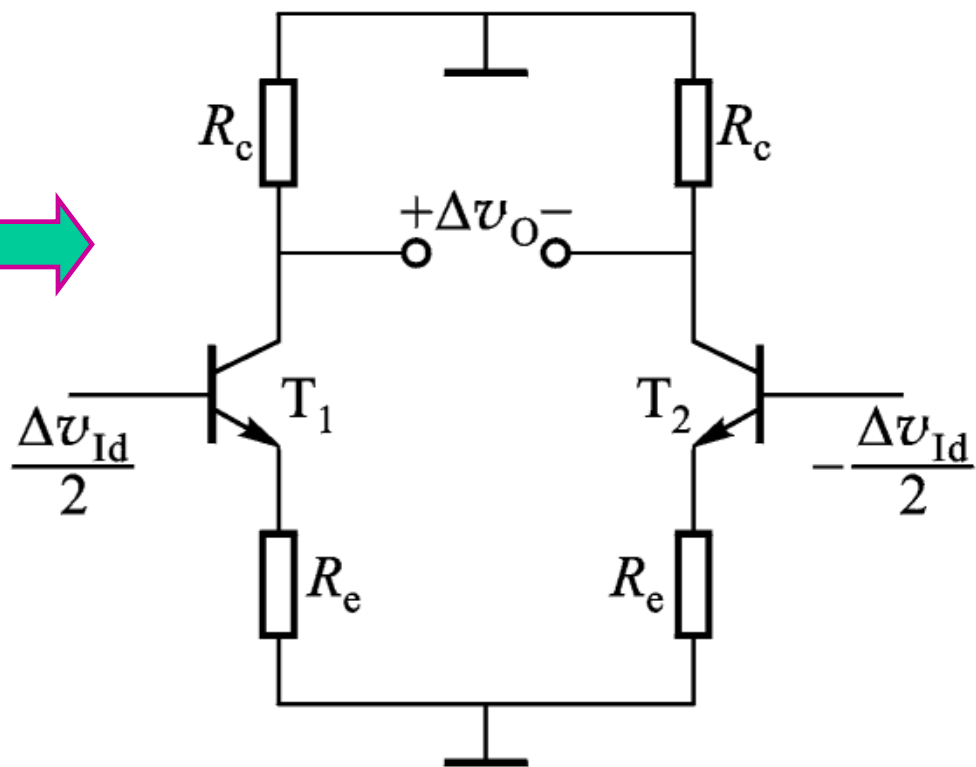
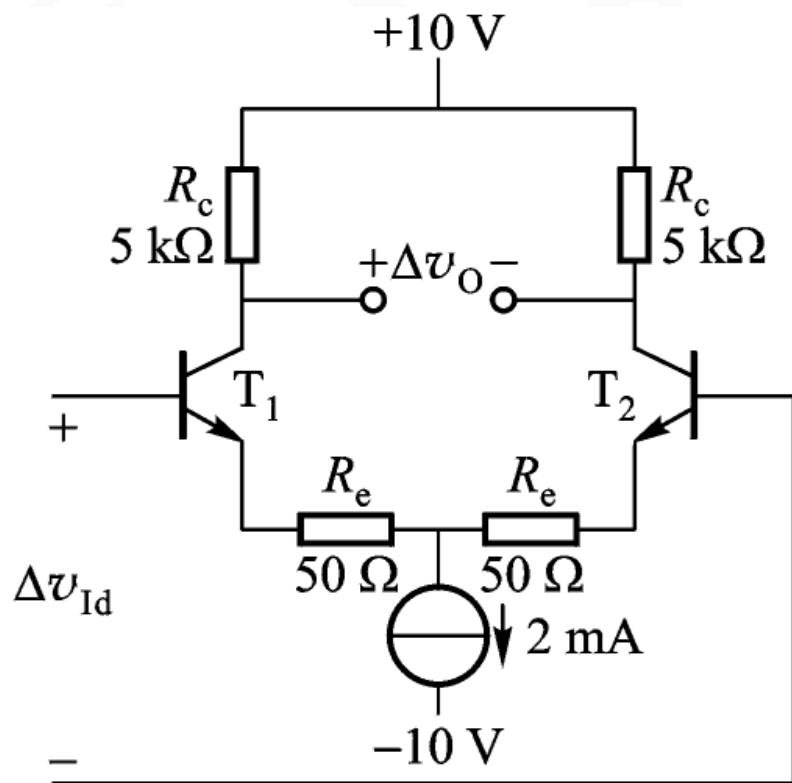
## 【例2】

差分放大电路如图所示，已知 $\beta=80$ ， $r_{be}=2\text{k}\Omega$ 。  
求该电路的差模电压放大倍数 $A_{vd}$ 、差模输入电阻 $R_{id}$   
和输出电阻 $R_o$ 。





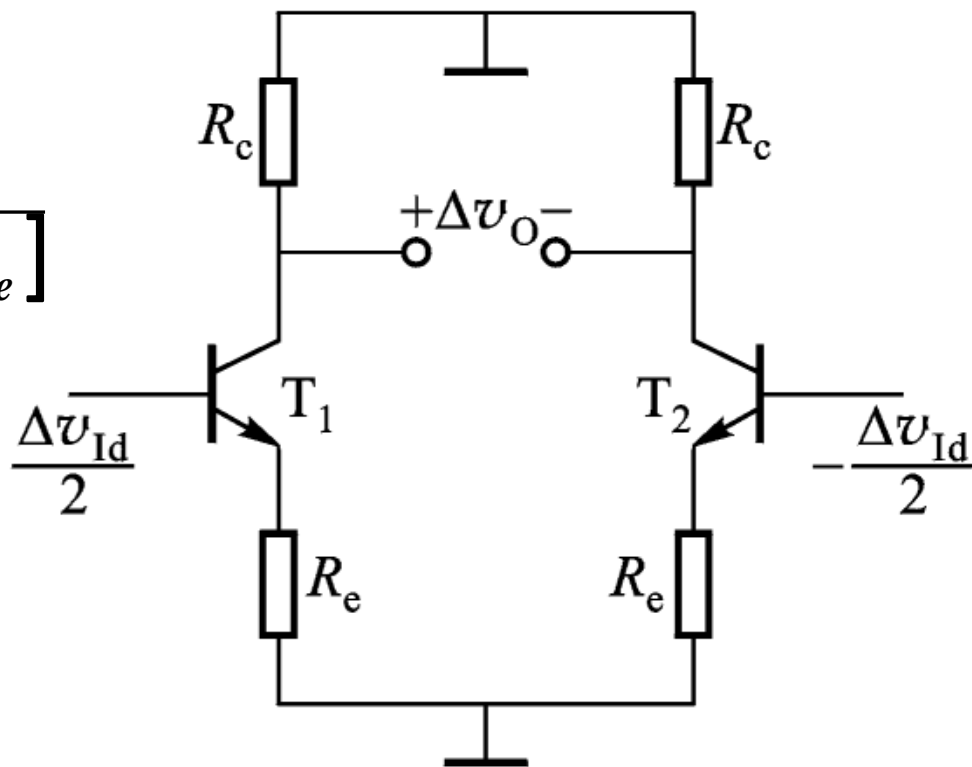
【解】 先画出差模交流通路：







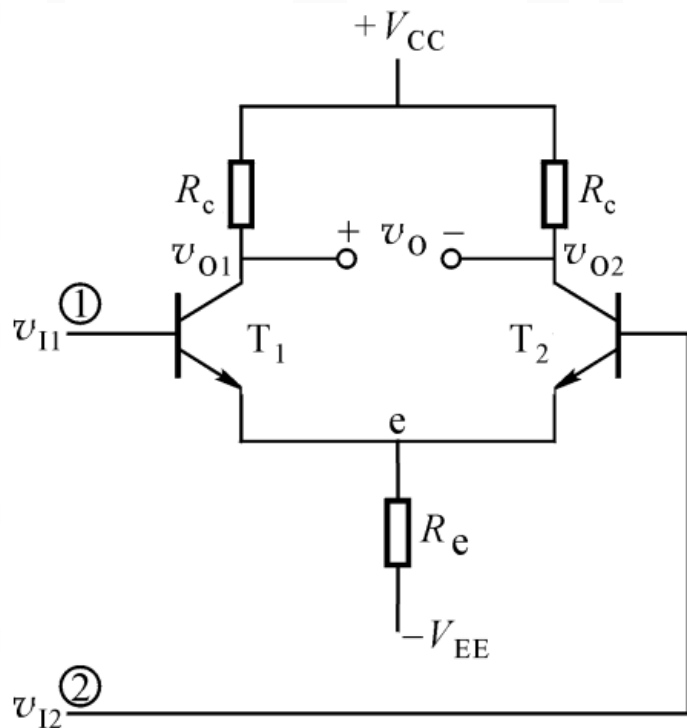
$$\begin{aligned}
 A_{vd} &= \frac{\Delta v_{Od}}{\Delta v_{Id}} \\
 &= \frac{-2\beta\Delta i_B R_c}{2[\Delta i_B r_{be} + (1+\beta)\Delta i_B R_e]} \\
 &= -\frac{\beta R_c}{r_{be} + (1+\beta)R_e} \\
 &= -\frac{80 \times 5}{2 + 81 \times 0.05} = -66.1
 \end{aligned}$$



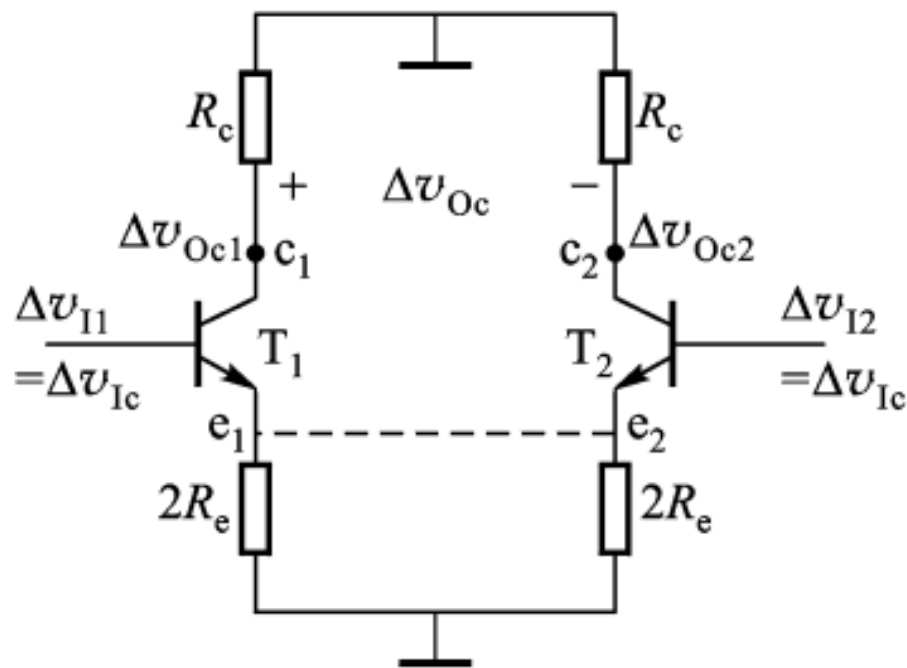
$$R_{id} = \frac{\Delta v_{Id}}{\Delta i_{Id}} = 2[r_{be} + (1+\beta)R_e] = 2 \times (2 + 81 \times 0.05) = 12.1 \text{ k}\Omega$$

$$R_o = \left. \frac{\Delta v'_O}{\Delta i'_O} \right|_{\substack{R_L = \infty \\ \Delta v_{Id} = 0}} = 2R_c = 10 \text{ k}\Omega$$

## 共模分析



## 共模交流通路



$R_e$ 可看成是由两个阻值为 $2R_e$ 的电阻并联而成，因此共模交流通路可看成是由两个**完全对称**的共射放大电路组成（图中虚线可断开）。

## ✧ 共模电压放大倍数 $A_{vc}$

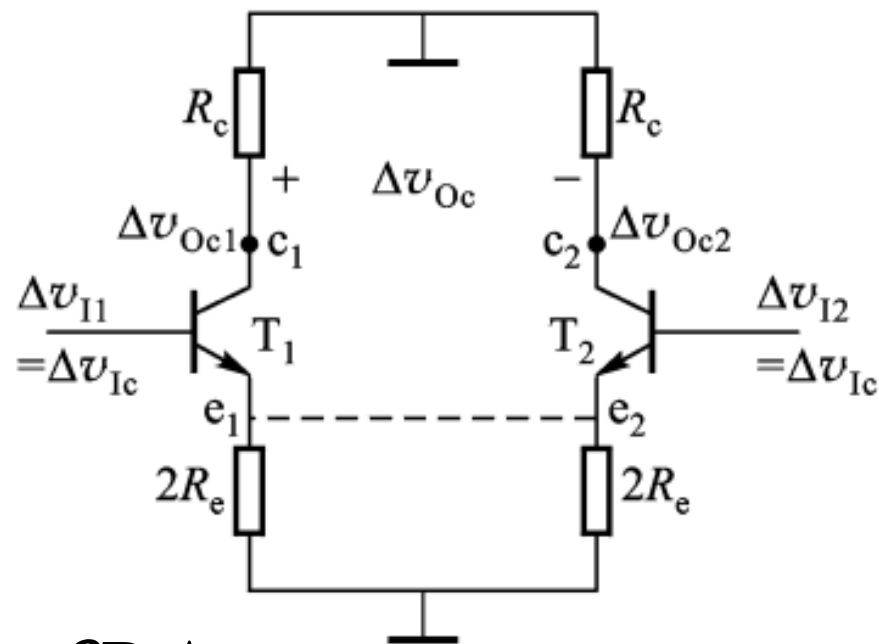
$$\begin{aligned}\Delta v_{Ic} &= \Delta i_B r_{be} + \Delta i_E 2R_e \\ &= \Delta i_B [r_{be} + 2(1 + \beta)R_e]\end{aligned}$$

$$\Delta i_B = \frac{\Delta v_{Ic}}{r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}$$

$$\Delta v_{Oc1} = \Delta v_{Oc2} = -\Delta i_C R_c = -\frac{\beta R_c \Delta v_{Ic}}{r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}$$

$$\Delta v_{Oc1} = \Delta v_{Oc2}$$

$$\Delta v_{Oc} = \Delta v_{Oc1} - \Delta v_{Oc2} = 0$$

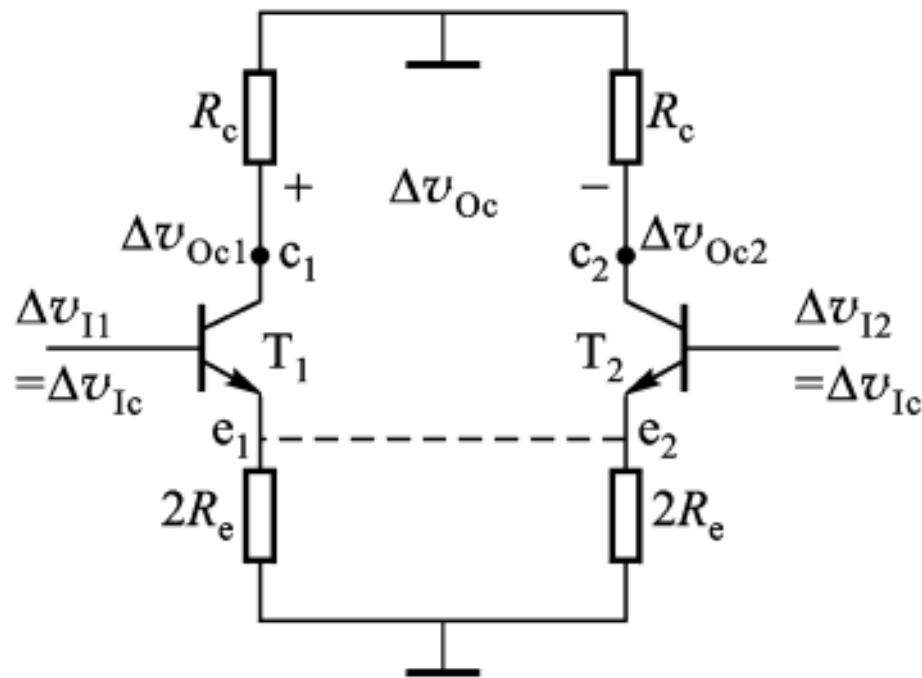


差分放大电路的两个输出端上的**共模输出电压大小相等并且极性也相同**；双端输出时，输出电压为零。

$$A_{vc1} = \frac{\Delta v_{Oc1}}{\Delta v_{Ic}} = -\frac{\beta R_c}{r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}$$

$$A_{vc2} = \frac{\Delta v_{Oc2}}{\Delta v_{Ic}} = -\frac{\beta R_c}{r_{be} + 2(1 + \beta)R_e}$$

$$A_{vc} = \frac{\Delta v_{Oc}}{\Delta v_{Ic}} = 0$$



若在 $c_1$ 、 $c_2$ 端接上负载 $R_L$ ，对共模特性有没有影响？

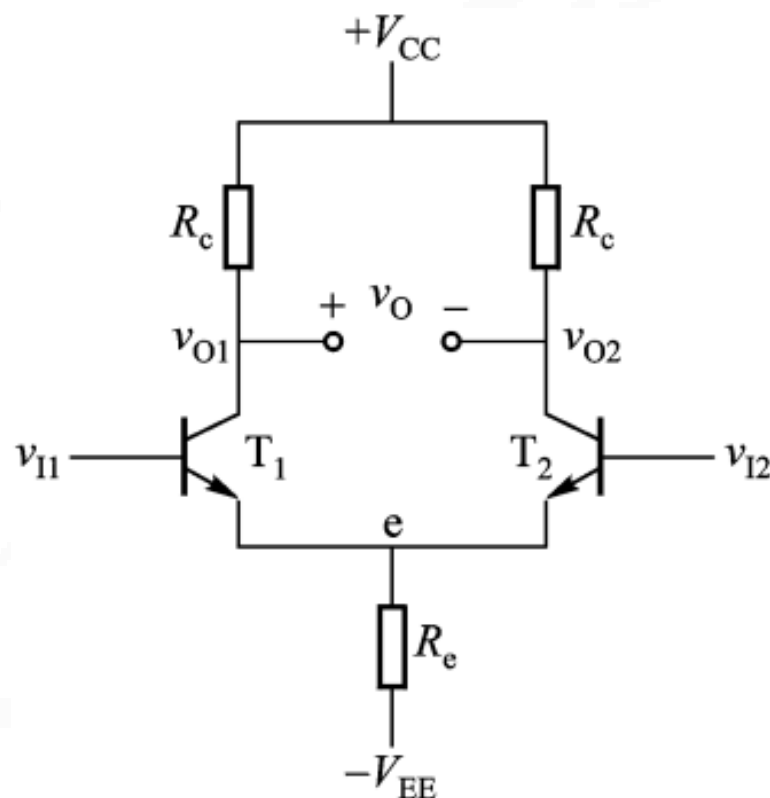
$A_{vc}$ 在一定程度上反映差分放大电路抑制共模干扰和温漂的能力， $A_{vc}$ 越小，则抑制能力越强。

## ✧ 共模抑制比 $K_{CMR}$

定义为差模电压放大倍数与共模电压放大倍数之比的绝对值。

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right|$$

常用分贝表示:  $K_{CMR} = 20 \lg \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right| \text{ (dB)}$



理想的差分放大电路双端输出时,  $K_{CMR} \rightarrow \infty$ 。



## ➤ 小结与讨论：差分放大电路的特性

- ✧ 两个输出端上的差模电压大小相等、极性相反；共模电压大小相等、极性也相同。
- ✧ 双端输出时，差模电压放大倍数与对应的共射电路相同。
- ✧ 单端输出时，差模电压放大倍数是双端输出时的一半。
- ✧ 双端输出时， $R_o=2R_c$ ；单端输出时， $R_o=R_c$ 。

## 二、差分放大电路在单端输入时的分析

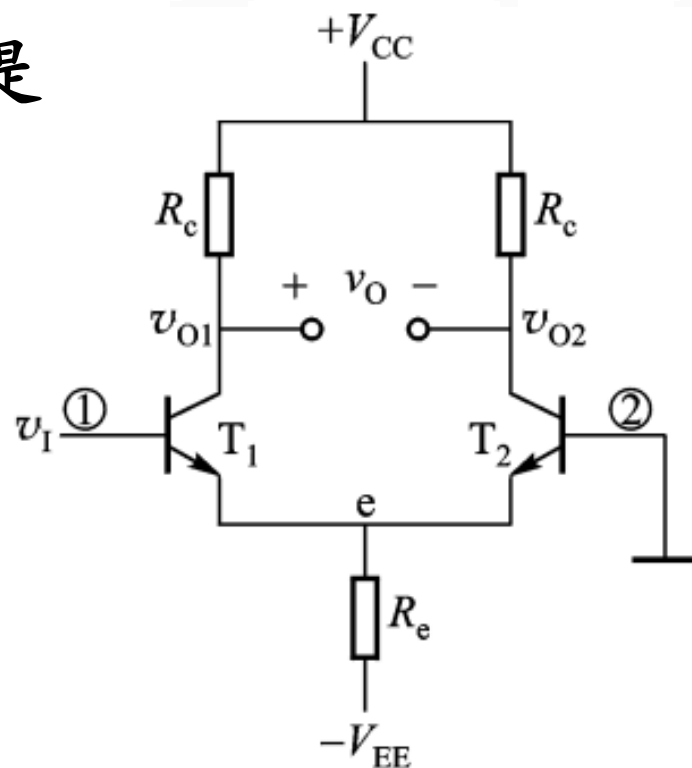
✧ 差分放大电路也可采用单端输入，即两个输入端中有一个接地，此时输出仍然可以双端输出或单端输出。

①端输入，②端接地：看成是双端输入的一个特殊情况。

$$\Delta v_{I1} = \Delta v_I, \quad \Delta v_{I2} = 0。$$

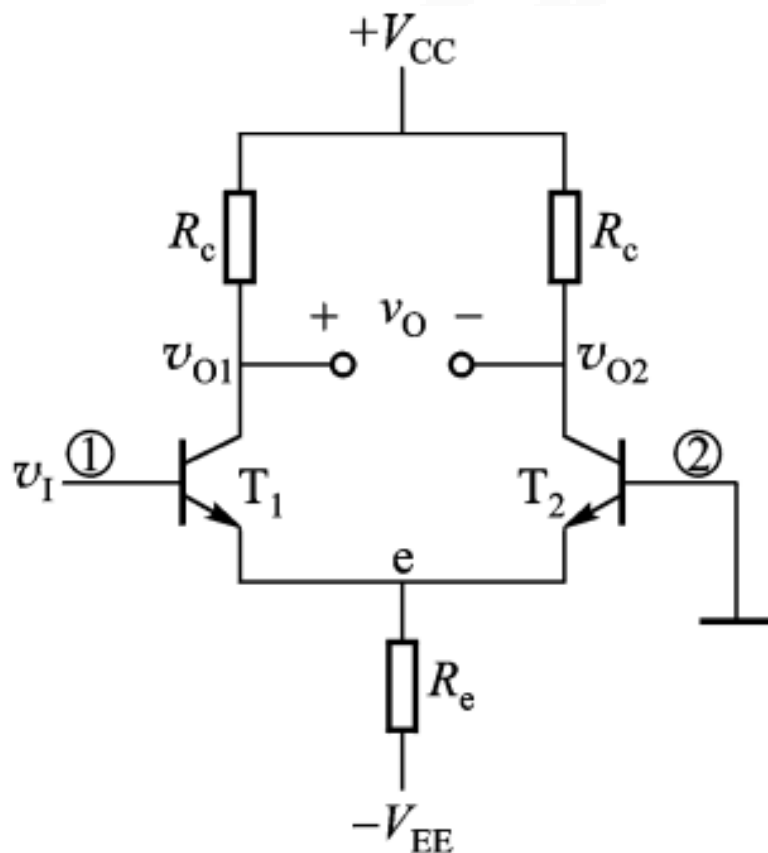
$$\Delta v_{Id} = \Delta v_{I1} - \Delta v_{I2} = \Delta v_I$$

$$\Delta v_{Ic} = \frac{\Delta v_{I1} + \Delta v_{I2}}{2} = \frac{\Delta v_I}{2}$$





$$\begin{aligned}\Delta v_O &= A_{vd} \Delta v_{Id} + A_{vc} \Delta v_{Ic} \\ &= A_{vd} \Delta v_I + A_{vc} \frac{\Delta v_I}{2} \\ &\approx A_{vd} \Delta v_I\end{aligned}$$



- ✧ 单端输入时的电压放大倍数与差模输入时的电压放大倍数近似相同。
- ✧ 为什么单端输入时可以忽略共模的影响，双端输入却不可以忽略共模的影响？





## 【例3】

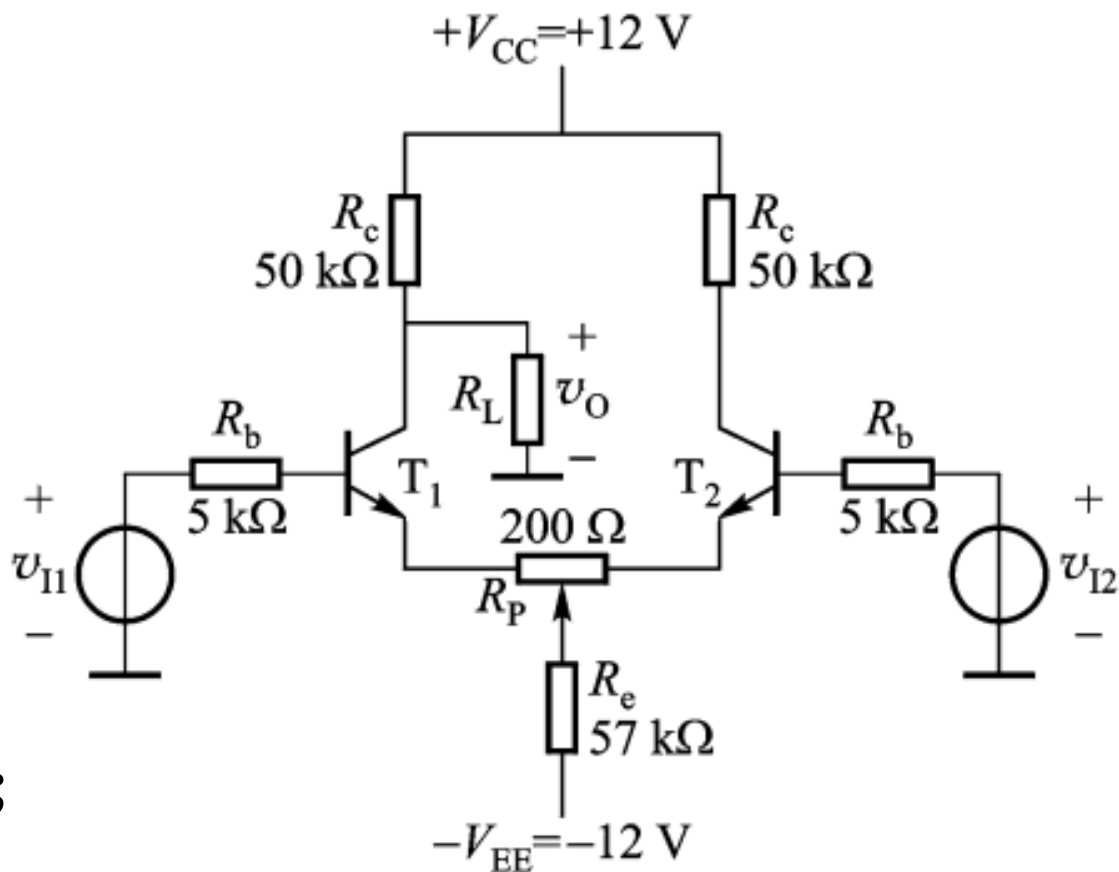
已知 $\beta=80$ ,  
 $r_{bb'}=100\Omega$ ,  $R_P=200\Omega$ ,  
滑动端居于中间  
位置,  $R_L=50k\Omega$ 。  
求:

(1)  $I_{CQ}$ 、 $V_{OQ}$ ;

(2)  $A_{vd}$ 、 $R_{id}$ 和 $R_o$ ;

(3)  $K_{CMR}$ ;

(4) 若 $\Delta v_{I1}=16mV$ ,  $\Delta v_{I2}=10mV$ , 求 $\Delta v_O$ 。



【解】 (1) 计算静态工作点。

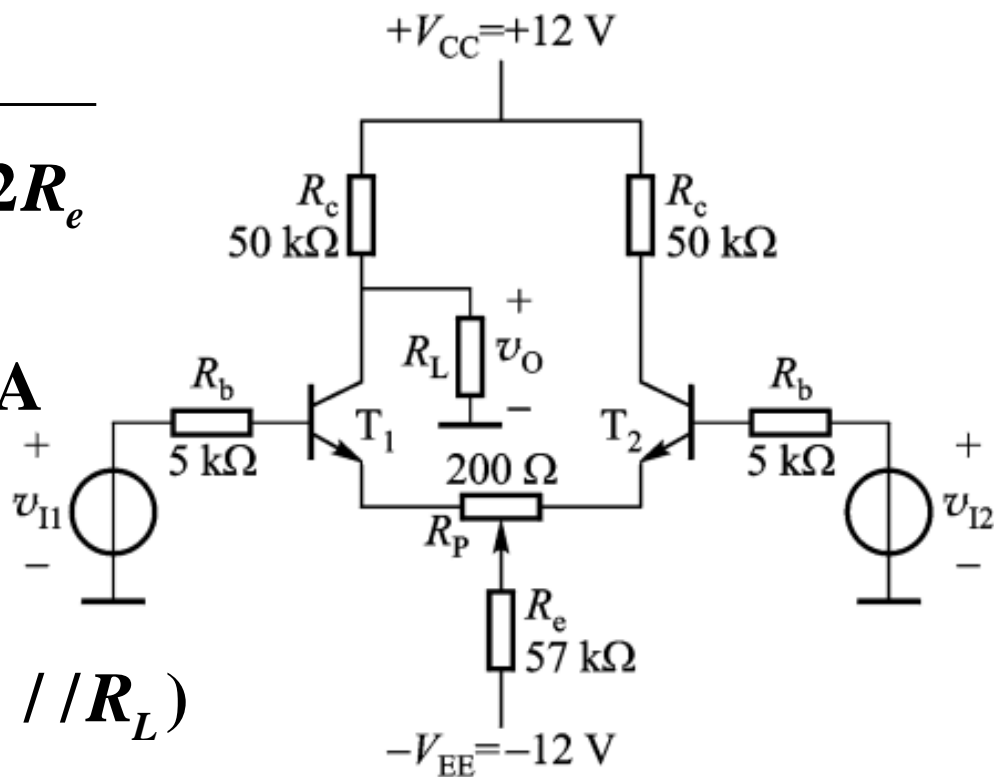
$$I_{BQ}R_b + V_{BE} + I_{EQ}\frac{R_P}{2} + 2I_{EQ}R_e - 12V = 0$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{12 - V_{BE}}{\frac{R_b}{1 + \beta} + \frac{R_P}{2} + 2R_e}$$

$$= \frac{12 - 0.6}{\frac{5}{81} + 0.1 + 2 \times 57} = 0.1 \text{ mA}$$

$$V_{OQ} = \frac{R_L}{R_c + R_L} V_{CC} - I_{CQ}(R_c // R_L)$$

$$= 6 - 0.1 \times 25 = 3.5 \text{ V}$$



$$(2) \quad r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{V_T}{I_{EQ}} = 100 + 81 \times \frac{26}{0.1} = 21.2 \text{ k}\Omega$$

$$A_{vd} = \frac{\Delta v_{Od}}{\Delta v_{Id}} = -\frac{1}{2} \frac{\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_P}{2}}$$

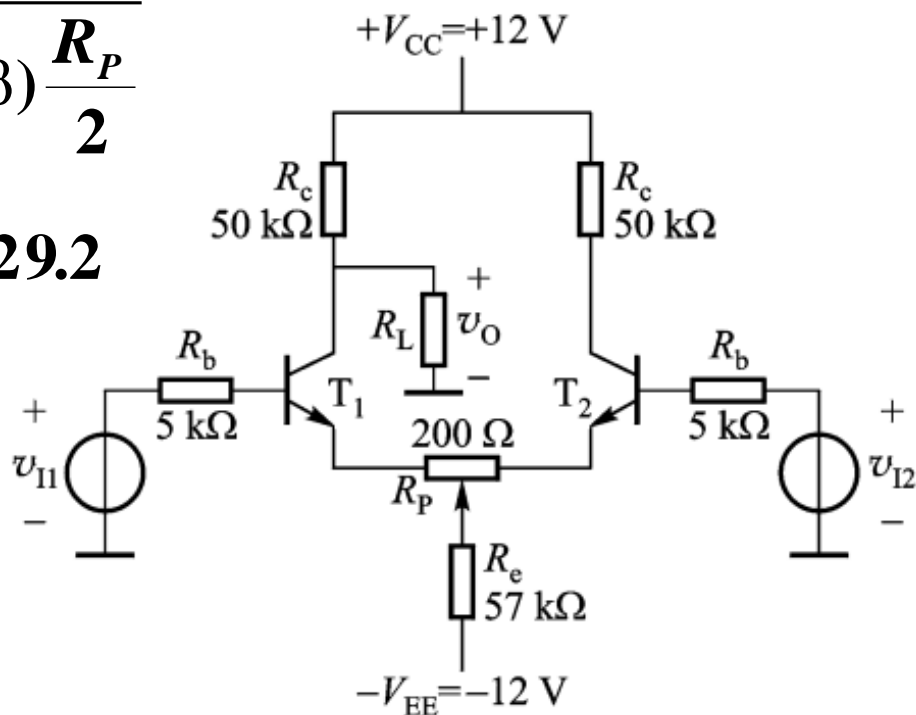
$$= -\frac{80 \times 25}{2[5 + 21.2 + 81 \times 0.1]} = -29.2$$

$$R_i = 2 \left[ R_b + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_P}{2} \right]$$

$$= 2[5 + 21.2 + 81 \times 0.1]$$

$$= 68.6 \text{ k}\Omega$$

$$R_o = R_c = 50 \text{ k}\Omega$$



### (3) 计算共模抑制比。

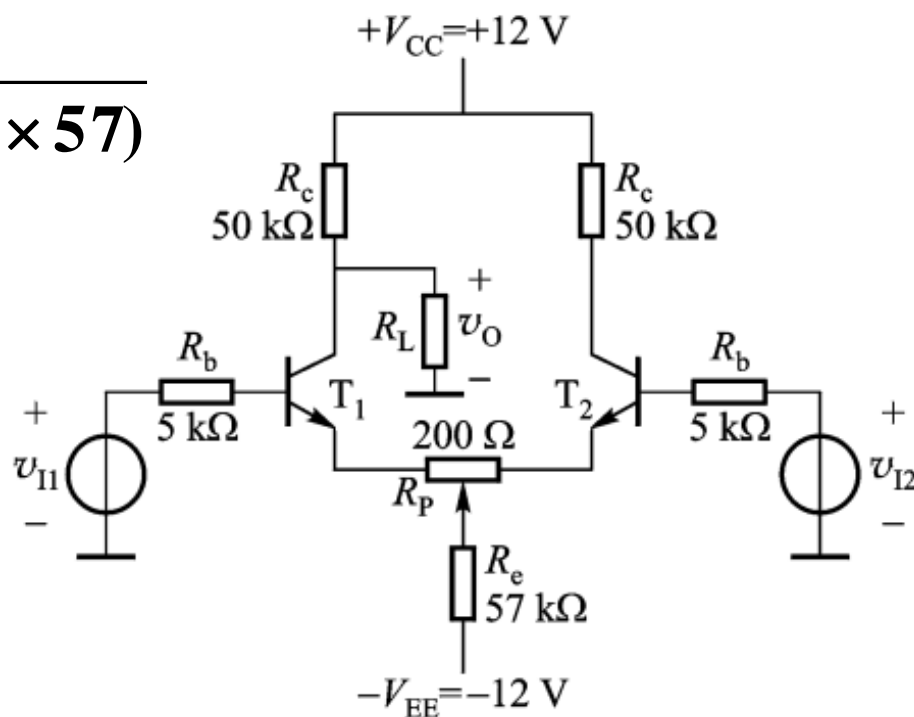
$$A_{vc} = - \frac{\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + (1 + \beta)(\frac{R_P}{2} + 2R_e)}$$

$$= - \frac{80 \times 25}{5 + 21.2 + 81 \times (0.1 + 2 \times 57)}$$

$$= -0.216$$

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right| = \frac{29.2}{0.216}$$

$$= 135 \quad (42.6\text{dB})$$



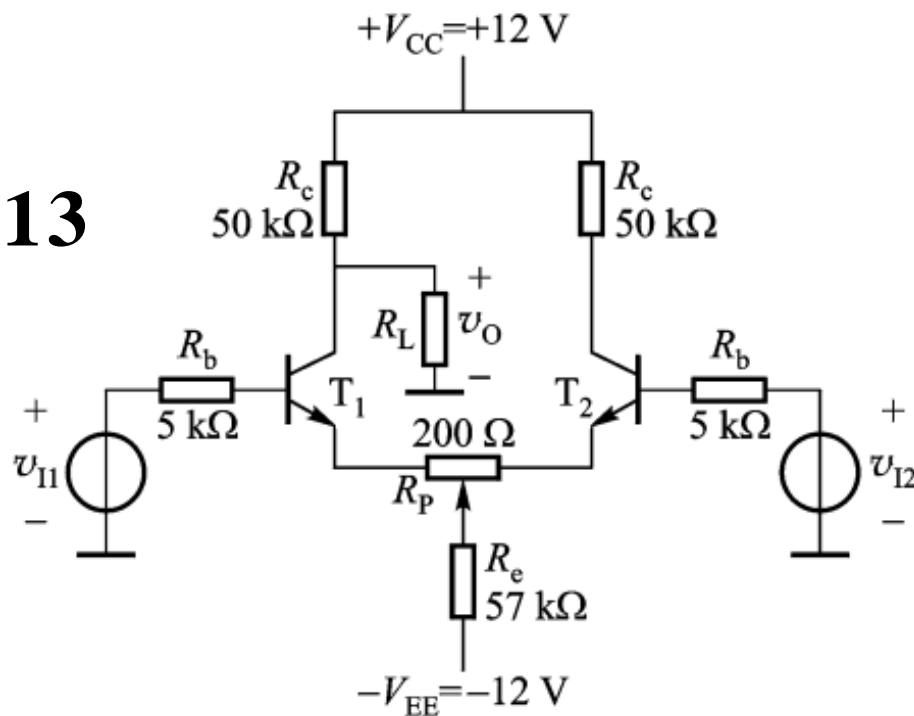


(4) 若  $\Delta v_{I1}=16\text{mV}$ ,  $\Delta v_{I2}=10\text{mV}$ , 则

$$\Delta v_{Id} = \Delta v_{I1} - \Delta v_{I2} = 6\text{mV}$$

$$\Delta v_{Ic} = \frac{\Delta v_{I1} + \Delta v_{I2}}{2} = 13\text{mV}$$

$$\begin{aligned}\Delta v_O &= A_{vd}\Delta v_{Id} + A_{vc}\Delta v_{Ic} \\ &= -29.2 \times 6 - 0.216 \times 13 \\ &= -178\text{mV}\end{aligned}$$



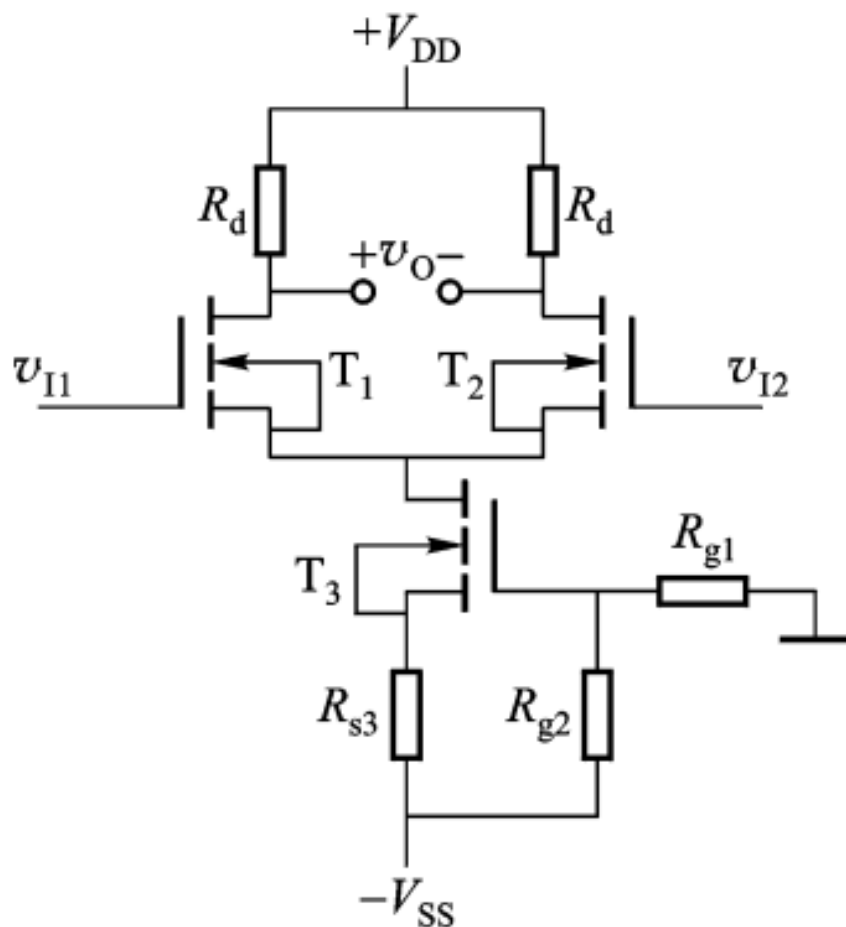
### 三、集成运放输入级的电路形式

在集成运放的输入级电路中，除了三极管差分放大电路外，还有FET差分放大电路及混合型差分放大电路。

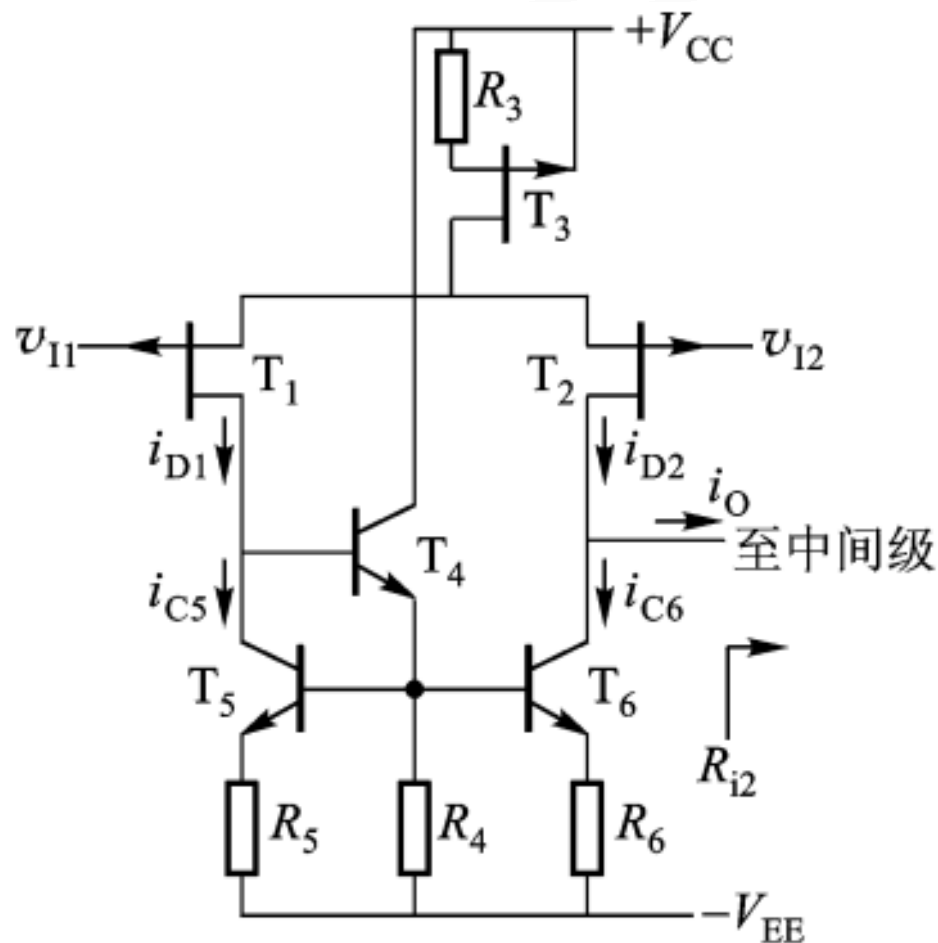
#### ➤ FET差分放大电路

##### FET差分放大电路

差模输入电阻很高，减小了输入偏置电流的不对称性。



✧ 共模输出电流得到很高的抑制





## 1.7 互补对称共集电路

- ✧ 集成运放的输出级，通常要求具有一定的驱动能力。不仅包括一定幅度的电压输出，还包括一定幅度的电流输出，即要求能输出一定的功率。
- ✧ 运放输出级作为电压源输出时，要求输出电阻小，并且最大不失真输出电压尽可能大。
- ✧ 另外，对于中间电压放大级来说，输出级为中间级负载，因此需要输出级的输入电阻应尽可能大。
- ✧ 共集组态放大电路具有输入电阻高、输出电阻小、带负载能力强的特点，因此运放输出级通常采用互补对称结构的共集放大电路。

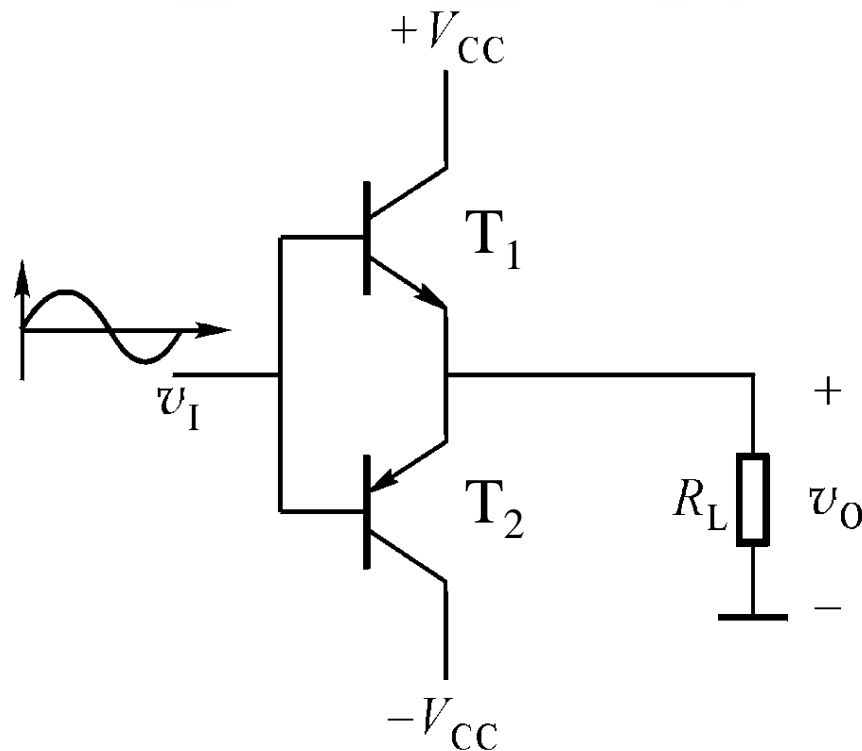


# 一、互补对称共集电路的基本形式

✧  $T_1$  为NPN管， $T_2$  为PNP管。

✧ 采用双电源供电，输出直接耦合。

✧ 称为OCL电路(Output Capacitorless)。

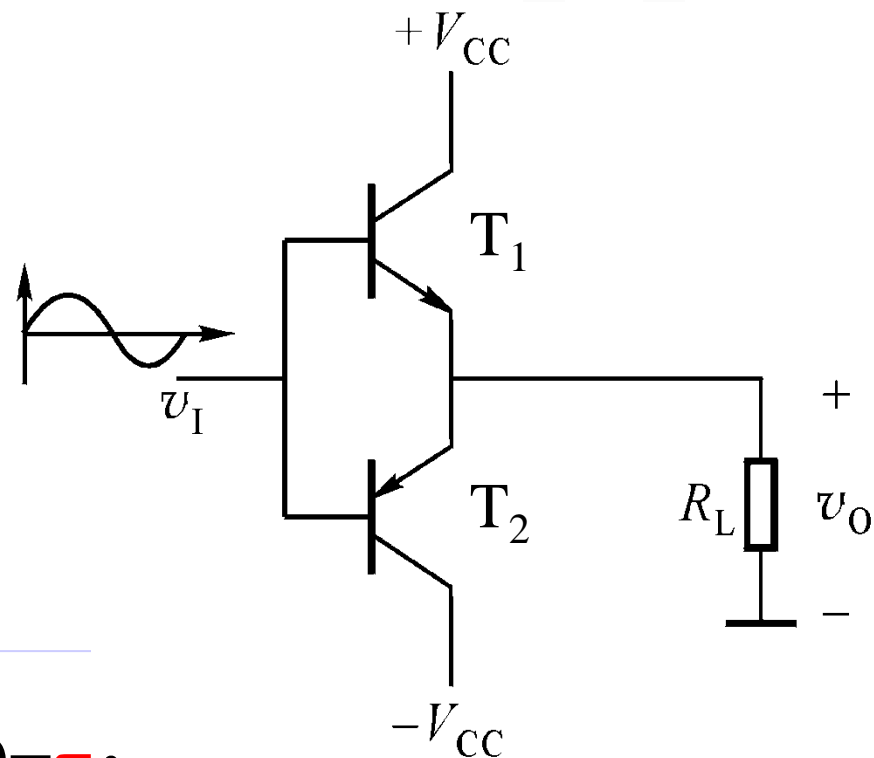


✧ 静态( $v_i=0$ )时， $T_1$ 、 $T_2$ 管均截止， $V_{OQ}=0$ 。

✧ 正半周( $v_i>0$ )时， $T_1$ 管导通， $T_2$ 管截止，

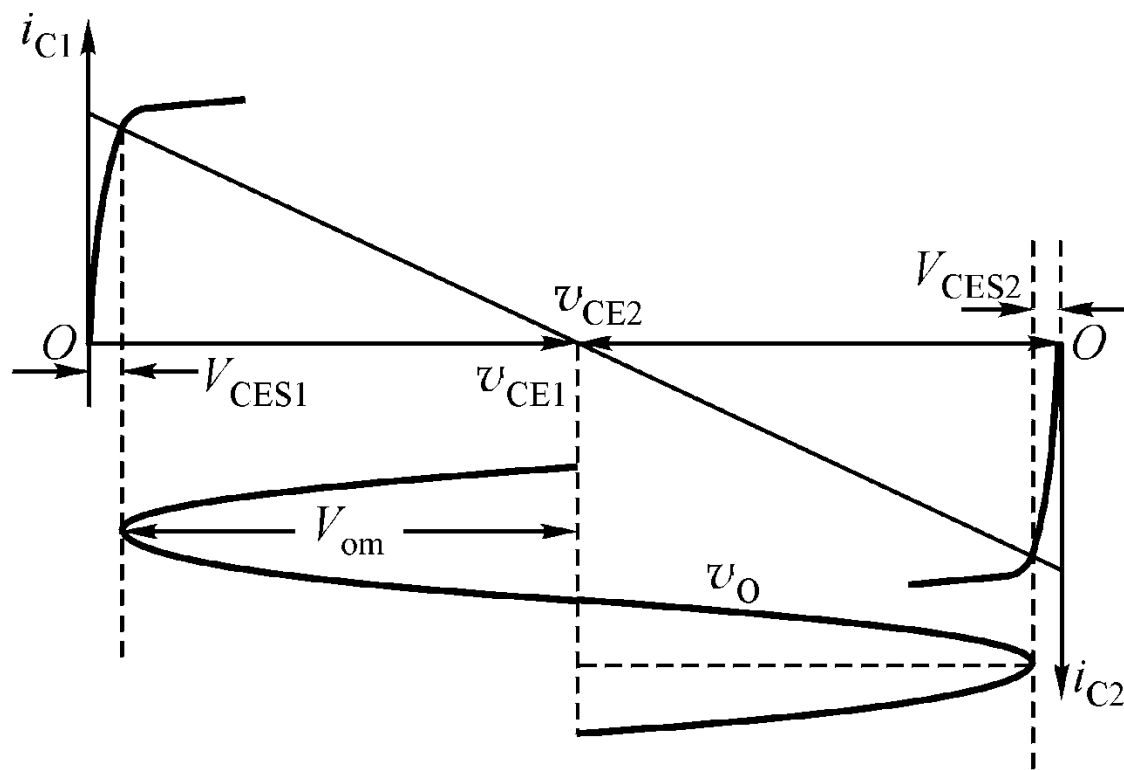
$+V_{CC} \rightarrow T_1 \rightarrow R_L \rightarrow \text{GND}$

✧ 负半周( $v_i < 0$ )时,  
 $T_1$ 管截止,  $T_2$ 管导通,  
 $\text{GND} \rightarrow R_L \rightarrow T_2 \rightarrow -V_{CC}$



- ✧ 乙类放大: 导通角为 $\theta = \pi$ ;
- ✧ 甲类放大: 导通角为 $\theta = 2\pi$ ;
- ✧ 甲乙类放大: 导通角介于 $\pi$ 和 $2\pi$ 之间。

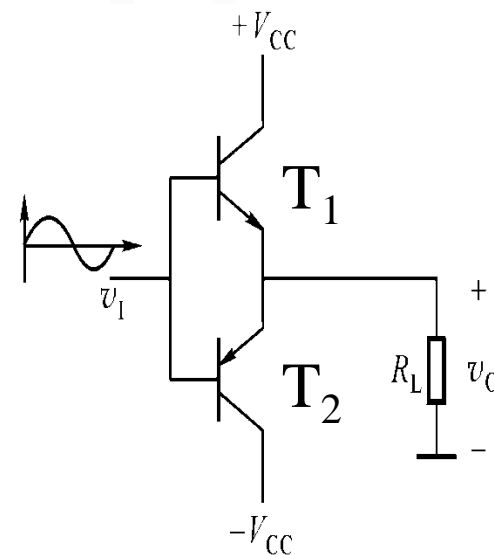
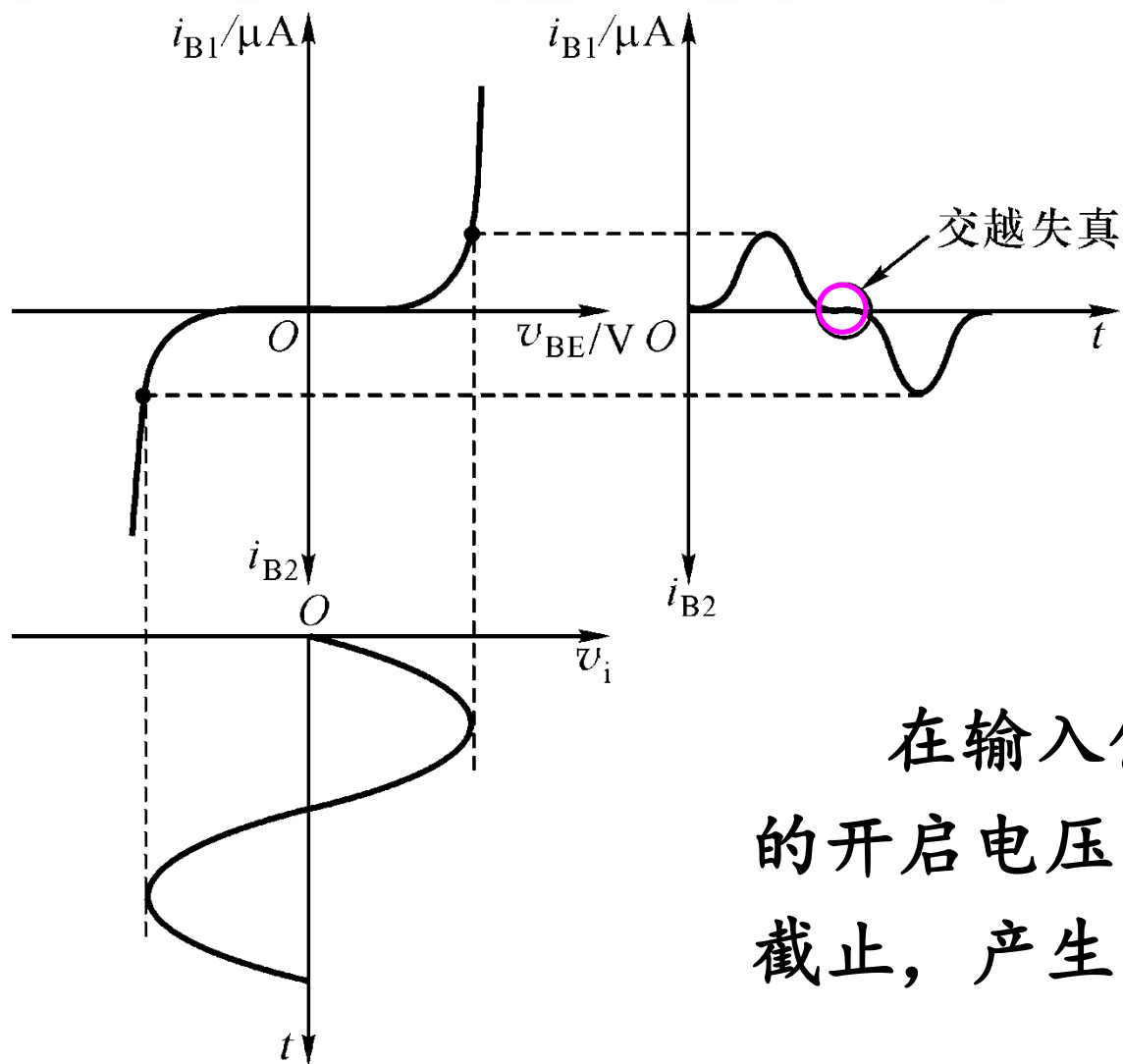
## ➤ 最大输出电压幅值



最大输出电压为  $V_{CC} - V_{CES}$ 。当电源电压为  $\pm 15V$  时，最大不失真输出电压幅度一般为  $\pm (12 \sim 14)V$ 。



## 交越失真

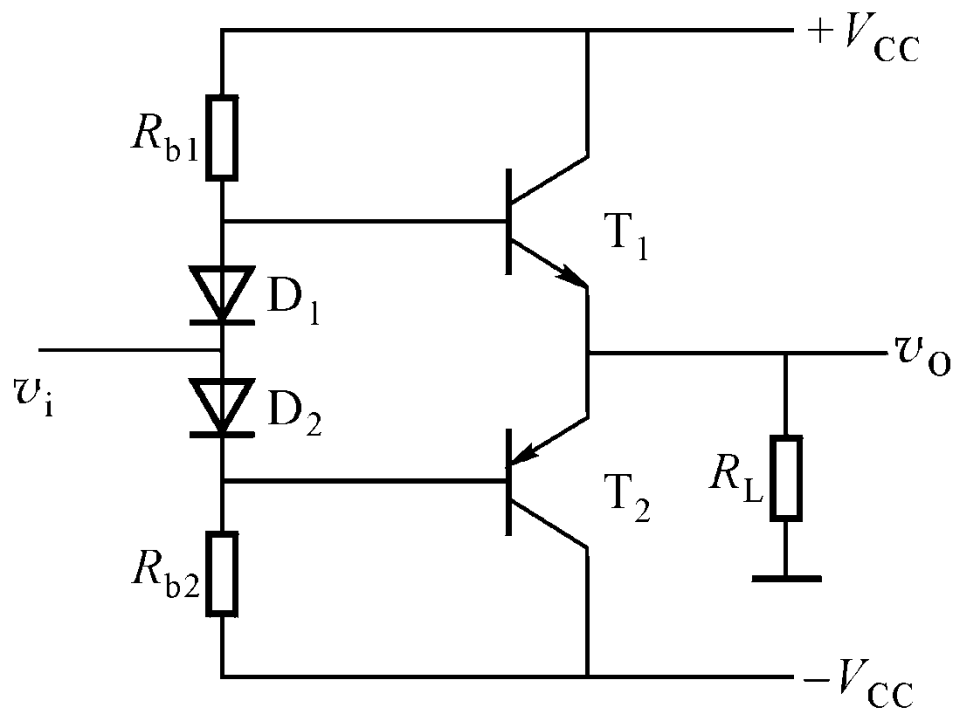


在输入信号小于三极管的开启电压时， $T_1$ 与 $T_2$ 管均截止，产生交越失真。



## 二、甲乙类互补对称共集电路

### ➤ 利用二极管提供静态偏置

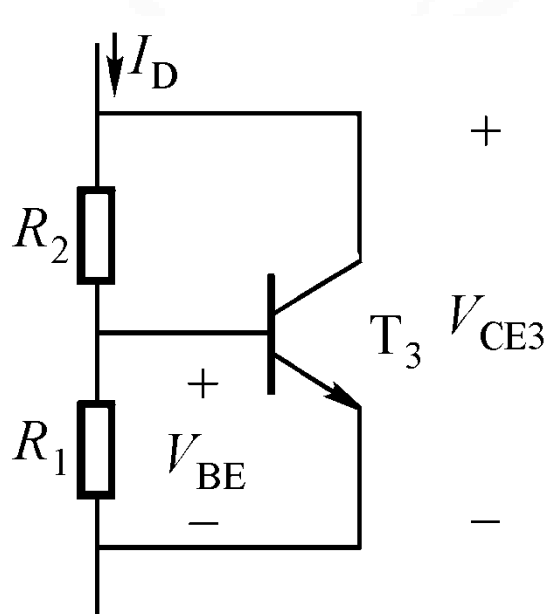


静态 $T_1$ 、 $T_2$ 处于微导通状态， $V_{OQ}=0$ 。当输入正弦波时，由于二极管的动态电阻很小，所以

$$v_{b1} \approx v_{b2} \approx v_i$$

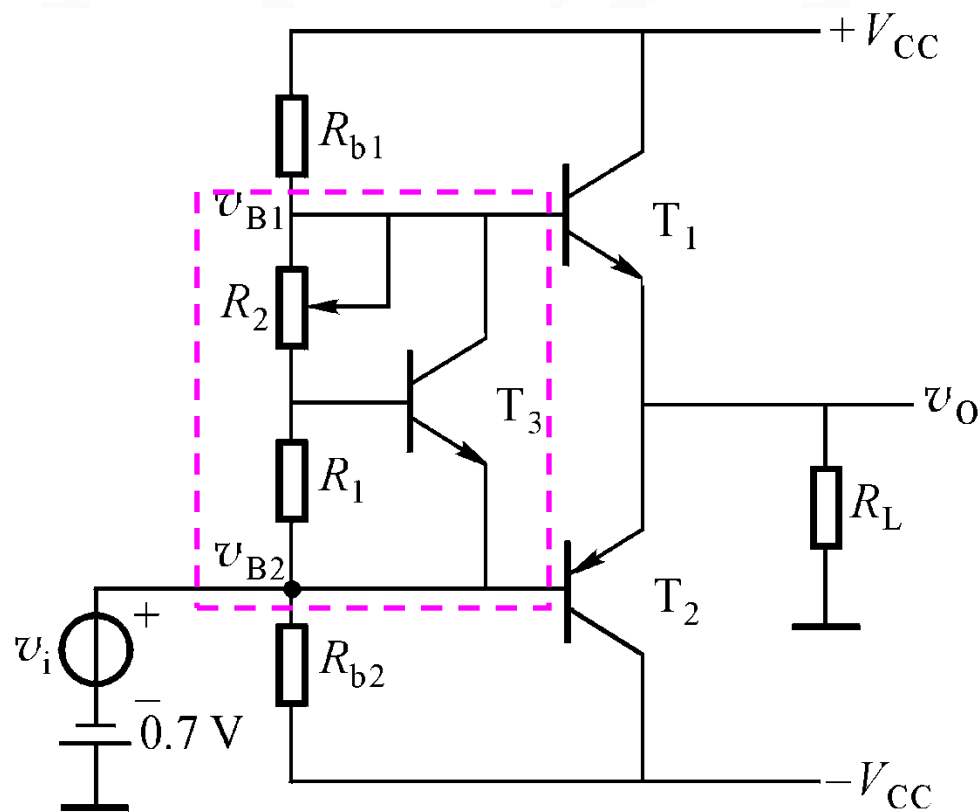


## ➤ 利用恒压源电路提供静态偏置



$$V_{BE3} \approx \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{CE3}$$

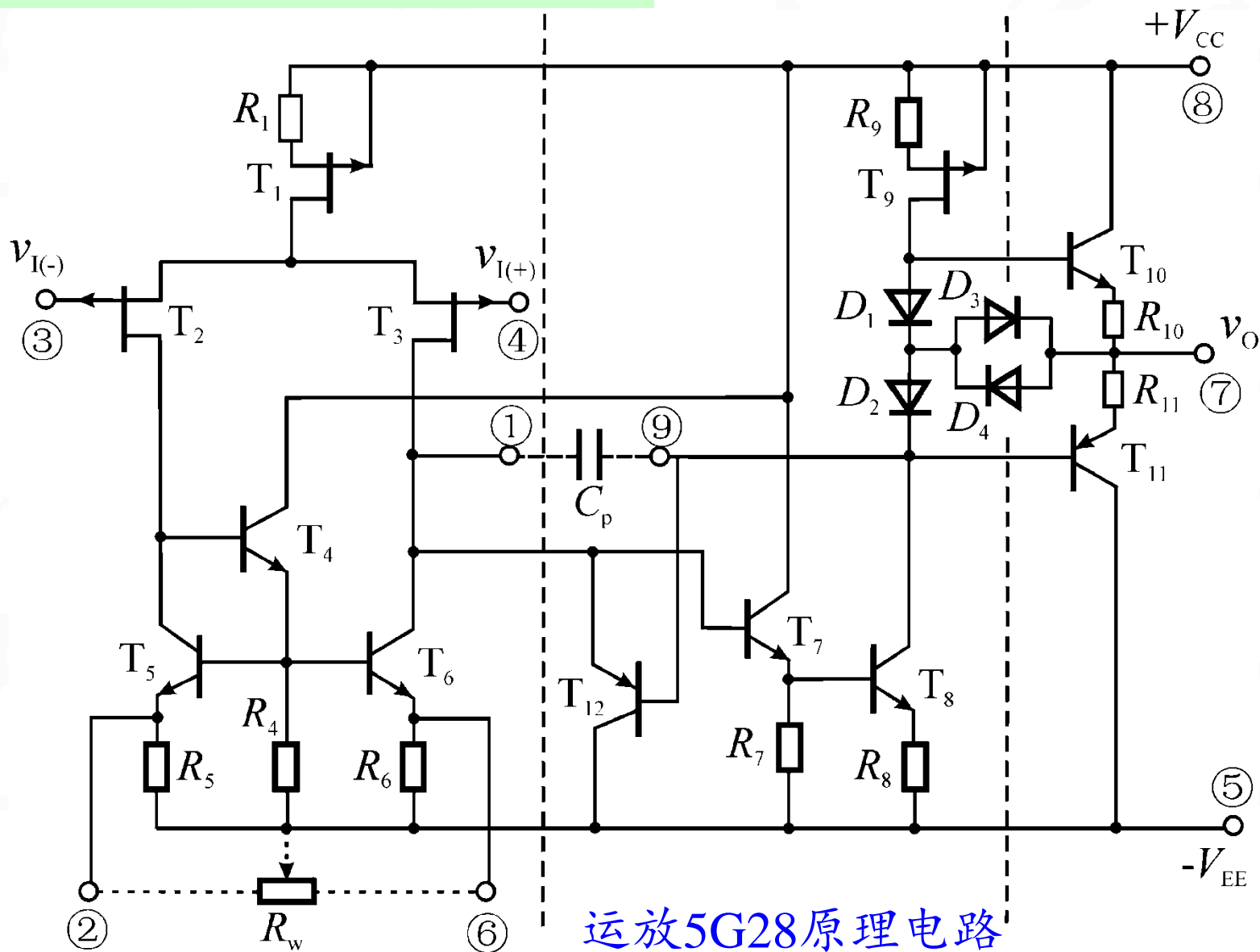
$$V_{CE3} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{BE}$$



选择合适的 $R_1$ 、 $R_2$ 阻值，使 $V_{CE3} \approx 1.4\text{V}$ 。

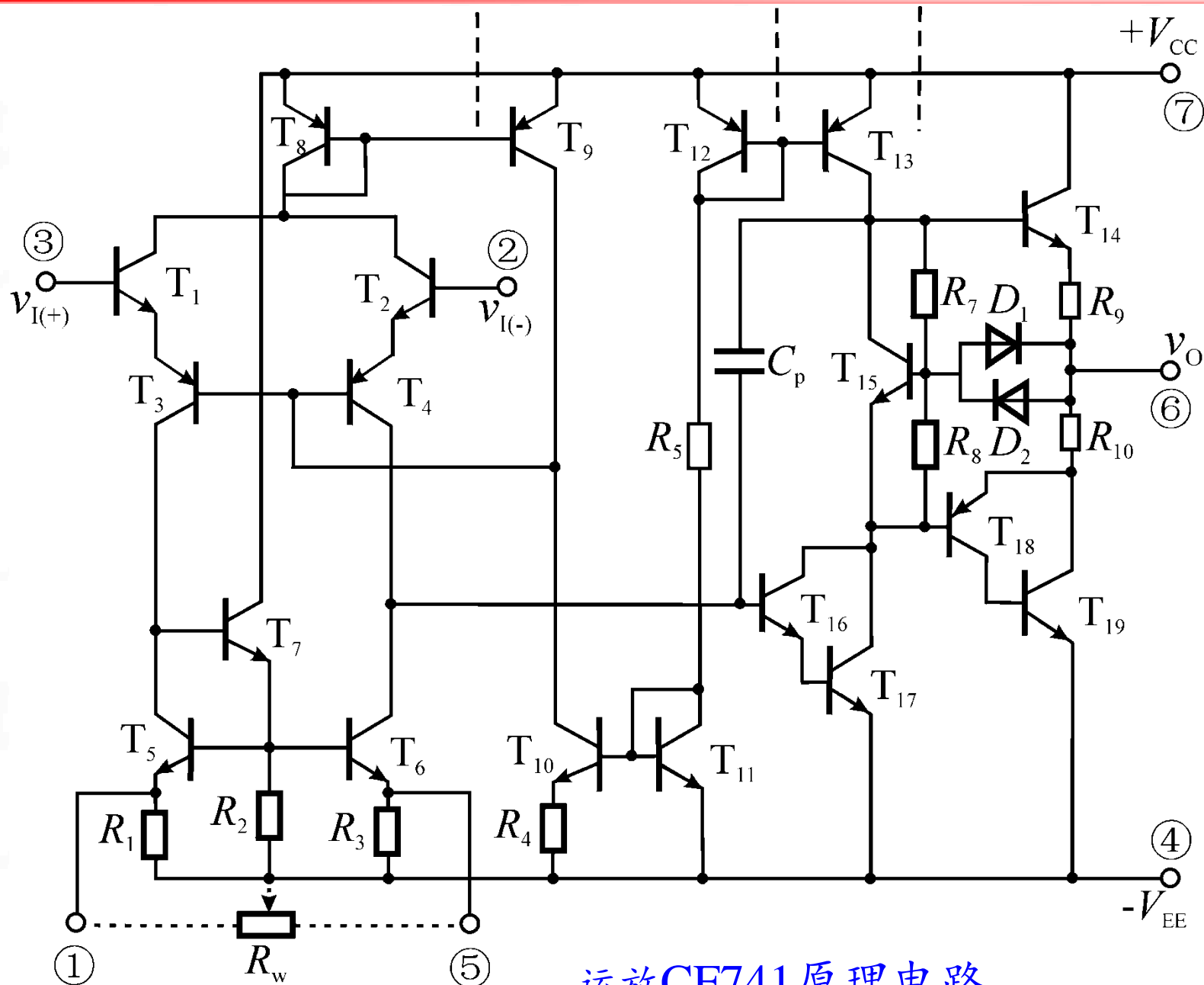


### 三、集成运放电路示例



运放5G28原理电路





运放CF741原理电路



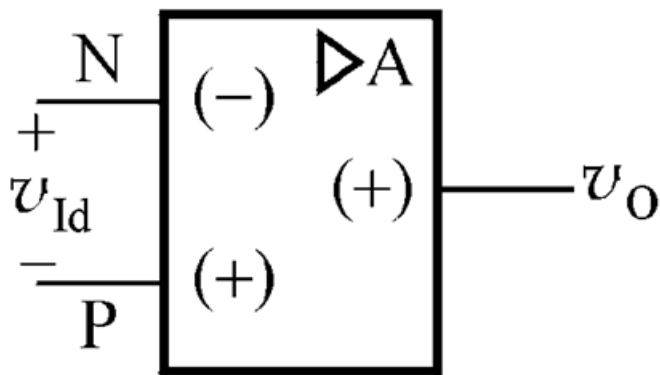




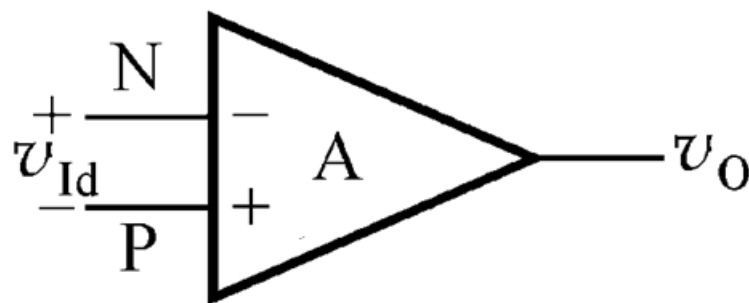
## 1.8 集成运放的特性与指标

### 一、集成运放的基本特性

#### ➤ 集成运放的电路符号



国标符号



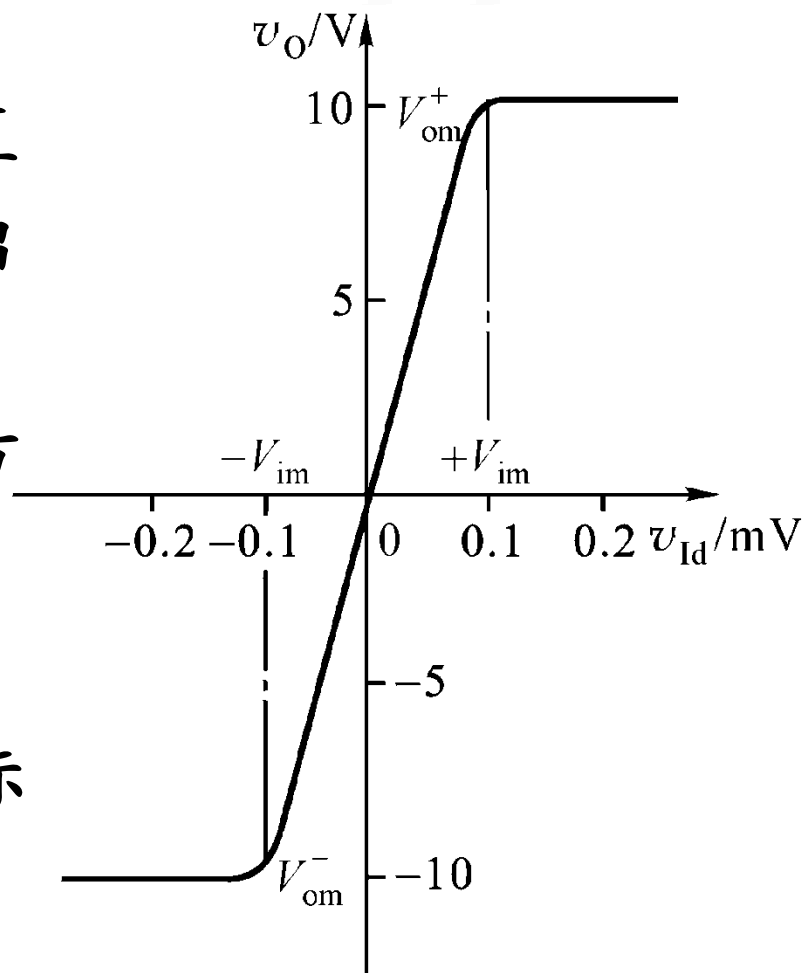
习惯画法

- 反相输入端
- 同相输入端

- 电源
- 调零端
- 电容补偿端

## ➤ 集成运放的电压传输特性

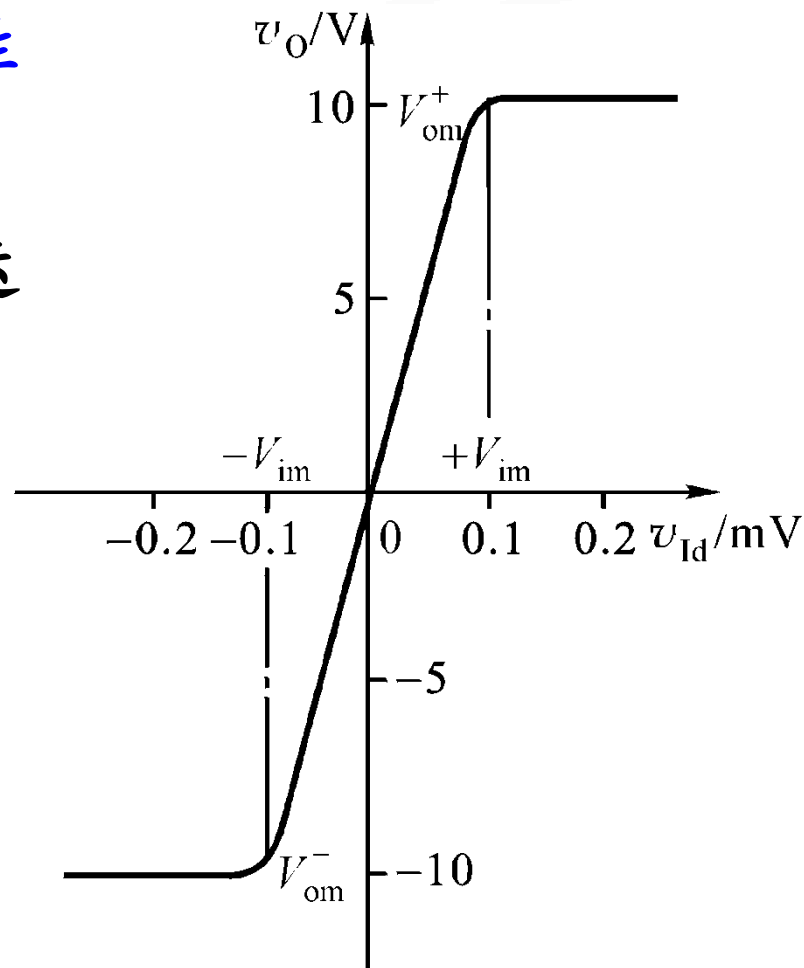
- ✧ 电压传输特性反映运放在直流或低频条件下的输入输出关系。
- ✧ 电压传输特性有两种表示方法：同相传输或反相传输。
- ✧ 在理想条件下，当  $v_{Id}=0$  时， $v_O=0$ ，即特性曲线通过坐标原点。
- ✧ 运放的电压既可以用增量(或交流量)表示，也可以用瞬时量表示。



$$\Delta v_{Id} = v_{Id} - 0 = v_{Id}$$

$$\Delta v_O = v_O - 0 = v_O$$

- ✧ 电压传输特性曲线分为线性放大区和饱和区。
- ✧ 线性放大区的斜率反映了运放的差模电压增益 $A_{vd}$  (开环电压增益)。
- ✧ 实际运放的  $V_{om}^+$  和  $V_{om}^-$  不一定相等, 但为了讨论方便, 常认为  $V_{om}^+ = |V_{om}^-| = V_{om}$ 。
- ✧ 当  $V_{CC}=15V$  时,  $V_{om}$  通常为  $\pm(12\sim14)V$ 。

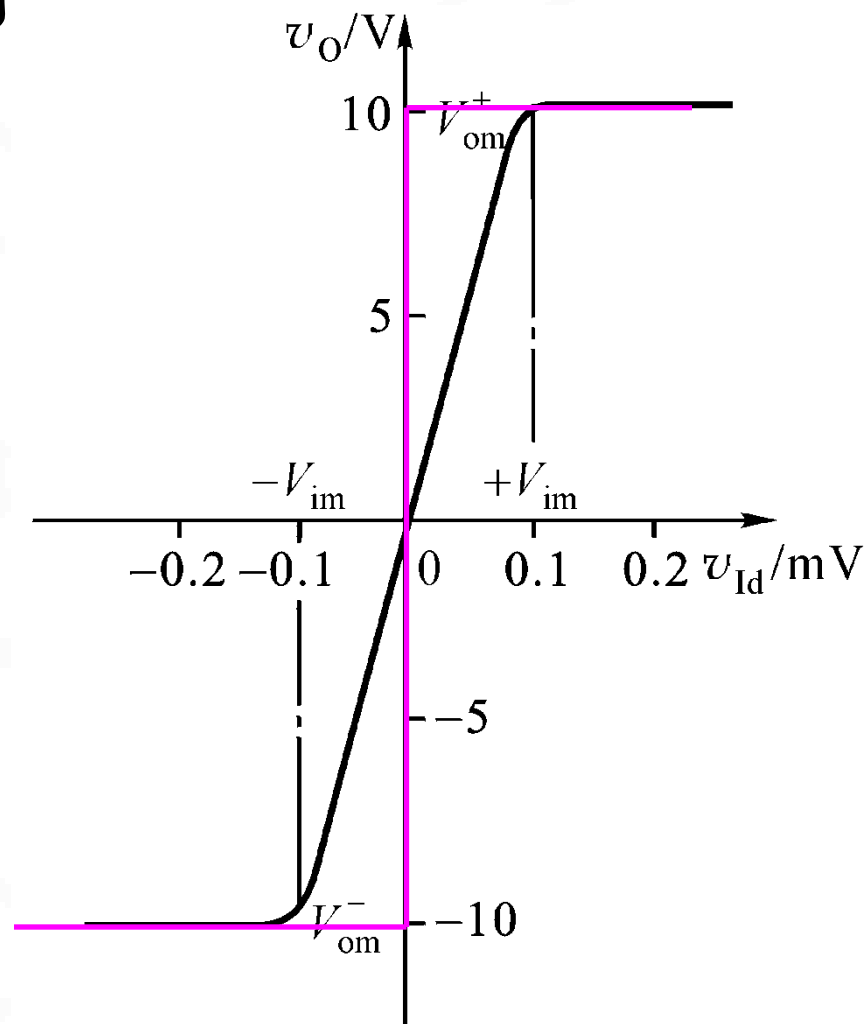


✧ 集成运放线性放大区所对应的输入信号范围很小。

例如设  $A_{od}=10^5$ ,  $V_{om}^-$ 、 $V_{om}^+$  为  $\pm 10V$ ,

$$\begin{aligned}\pm V_{im} &= \pm 10/10^5 \\ &= \pm 10^{-4}V \\ &= \pm 0.1mV\end{aligned}$$

✧ 理想运放的电压传输特性曲线位于纵坐标上。

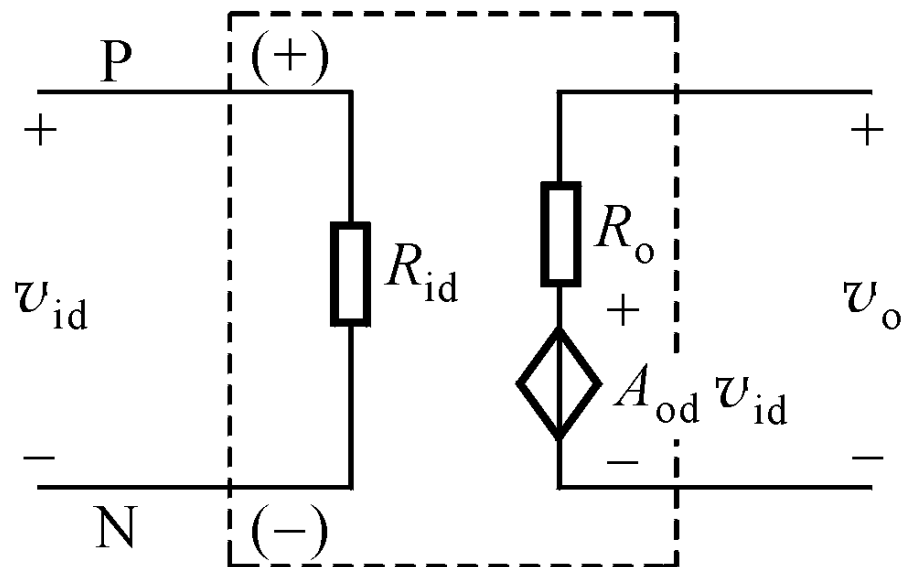


## 二、集成运放的主要参数

### 1、集成运放的三项基本参数

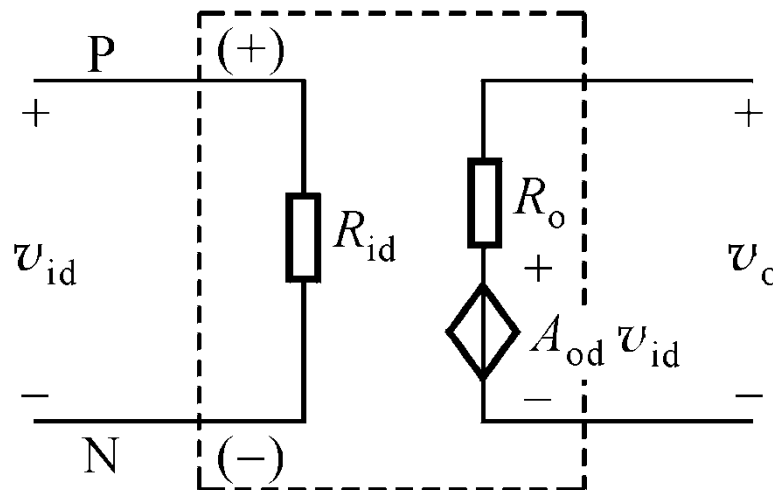
✧ 集成运放可以等效为一个压控电压源(VCVS)，小信号模型与放大电路模型相似。需要注意的是，运放的实际输出电压总为有限值（不可能大于电源电压）。

✧ 由该模型可得集成运放的三项基本参数：



# (1) 开环差模电压放大倍数 $A_{vd}$

$$A_{vd} = \frac{\Delta v_o}{\Delta v_{id}} = \frac{\Delta v_o}{\Delta v_P - \Delta v_N}$$

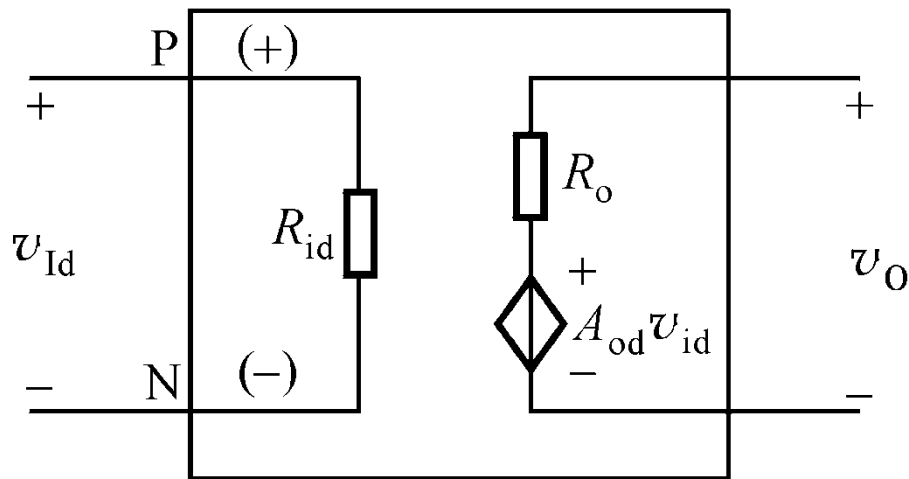


- ✧  $A_{vd}$ 一般为 $10^4 \sim 10^6$ (即80~120dB)。
- ✧ 在手册中常用 $A_{od}$ 表示，并以V/mV作单位，如100 V/mV即为 $10^5$ 。
- ✧ 当差模电压定义为反相输入端与同相输入端电压之差时， $A_{vd}$ 为负值。

## (2) 差模输入电阻 $R_{id}$

$$R_{id} = \frac{\Delta v_{Id}}{\Delta i_{Id}} = \frac{\Delta v_P - \Delta v_N}{\Delta i_{Id}}$$

通用型集成运放的  $R_{id}$  一般在 **1MΩ** 以上，高阻型运放的  $R_{id}$  可达 **10<sup>4</sup> MΩ** 以上。



## (3) 输出电阻 $R_o$

集成运放的  $R_o$  通常为 **100Ω 至 1kΩ** 之间。

✧ 理想运放:  $R_{id} \rightarrow \infty$ ,  $R_{od} \rightarrow 0$ ,  $A_{od} \rightarrow \infty$ 。

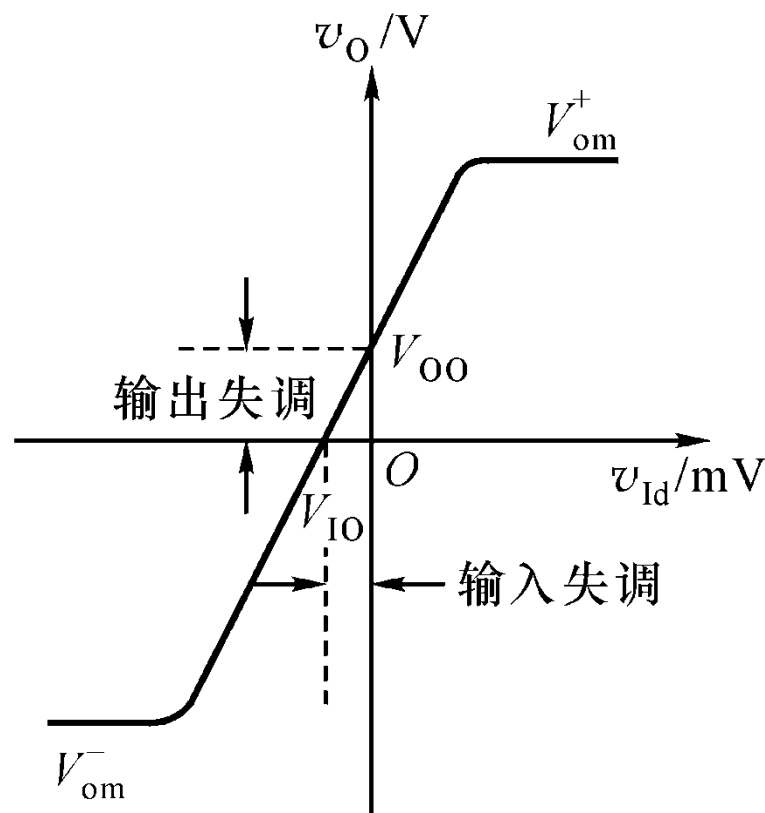
## 2、集成运放的失调参数

### (1) 输入失调电压 $V_{IO}$

集成运放在  $v_{Id}=0$  时的输出电压称作**输出失调电压**，记作  $V_{OO}$ 。

为了使输出电压回到零，需在输入端加上**反向补偿电压**，该补偿电压称为**输入失调电压**。

$$V_{IO} = -\frac{V_{OO}}{A_{od}}$$



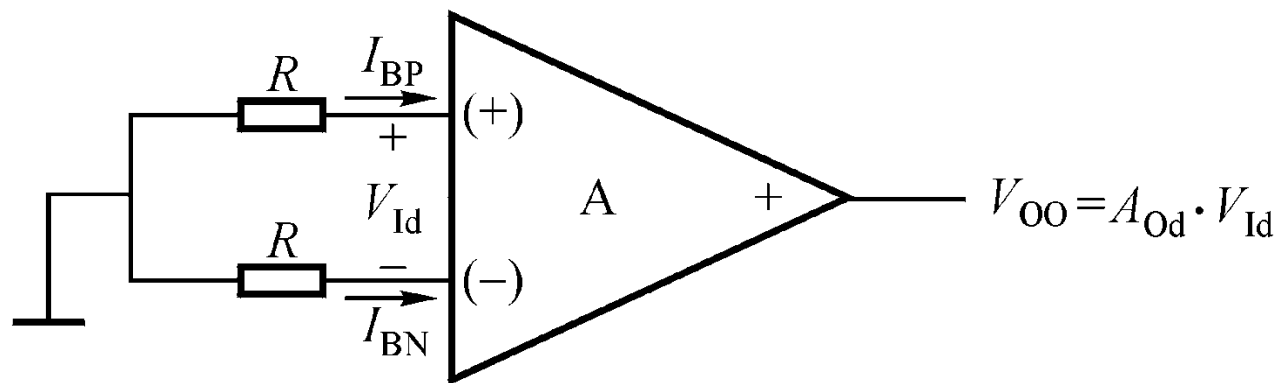
✧ 也可以说，输入失调电压是集成运放的输出失调电压折合到输入端的数值。



(2) 输入失调电流  $I_{IO}$

(3) 输入偏置电流  $I_{IB}$

当集成运放输入端通过电阻接地时，



$$I_{IO} = |I_{BP} - I_{BN}| \quad \Rightarrow \quad \text{输入失调电流}$$

$$I_{IB} = \frac{I_{BP} + I_{BN}}{2} \quad \Rightarrow \quad \text{输入偏置电流}$$

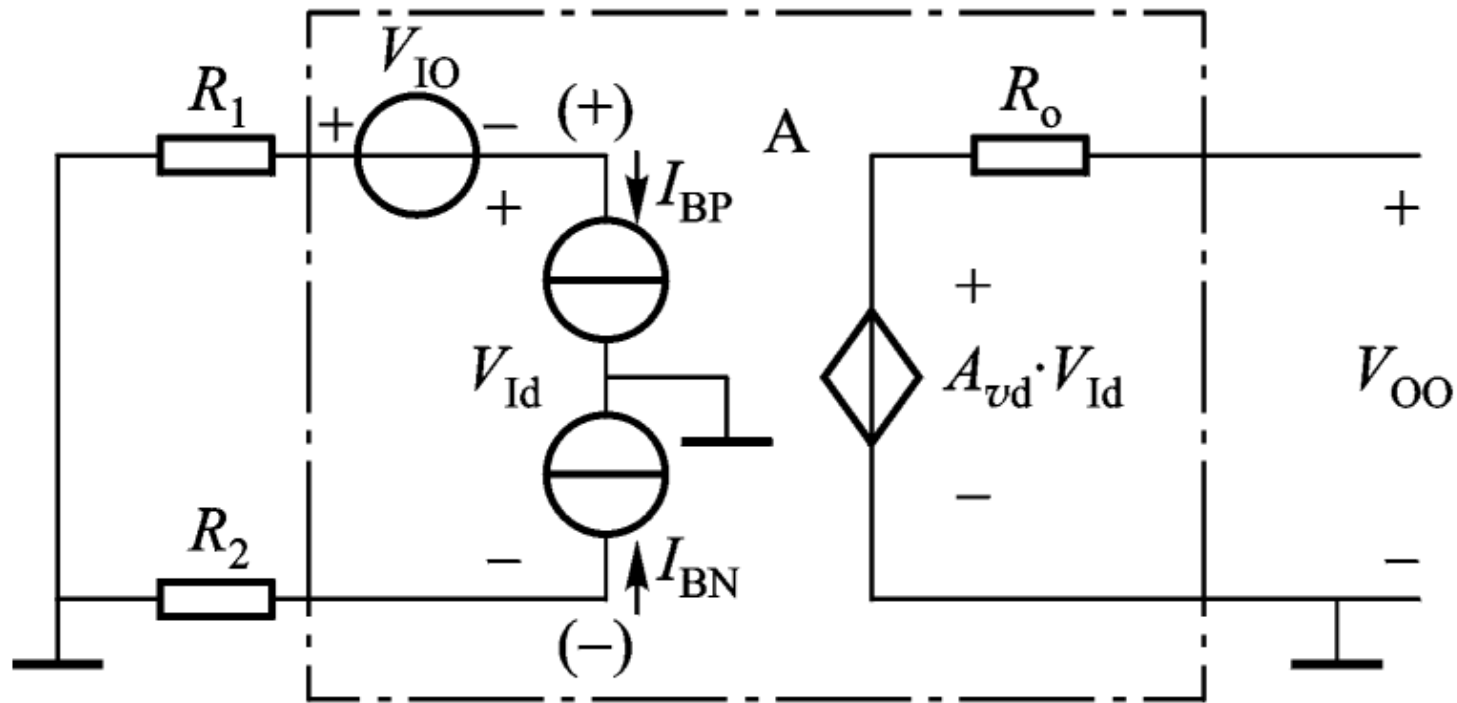
- ✧  $V_{IO}$ 、 $I_{IO}$ 反映了运放内部差分输入级的失配程度和不平衡度。其值越小，表明输入级的对称性和平衡度越好。
- ✧  $V_{IO}$ 失调电压主要反映了运放输入级 $V_{BE}$ 的失配程度。 $I_{IO}$ 失调电流主要反映了运放输入级 $I_B$ 的失配程度。
- ✧ 集成运放在实际使用时，可以通过外接调零电位器将输出失调调整到0。



## (4) 输入失调温漂

- ✧ 输入失调参数会随温度的变化而变化，称为温度漂移，简称温漂。
- ✧ 输入失调温漂包括输入失调电压漂移  $dV_{IO}/dT$  和输入失调电流温漂  $dI_{IO}/dT$ 。
- ✧ 与输入失调参数本身相比，失调温漂特性更难以补偿。

## ➤ 分析输出失调模型



$$\begin{aligned} V_{Id} &= I_{BN}R_2 - I_{BP}R_1 - V_{IO} \\ &= -V_{IO} - (I_{BP}R_1 - I_{BN}R_2) \end{aligned}$$

$$V_{Id} = -V_{IO} - (I_{BP}R_1 - I_{BN}R_2)$$

$$= -V_{IO} - \left[ \left( I_{IB} + \frac{I_{IO}}{2} \right) R_1 - \left( I_{IB} - \frac{I_{IO}}{2} \right) R_2 \right]$$

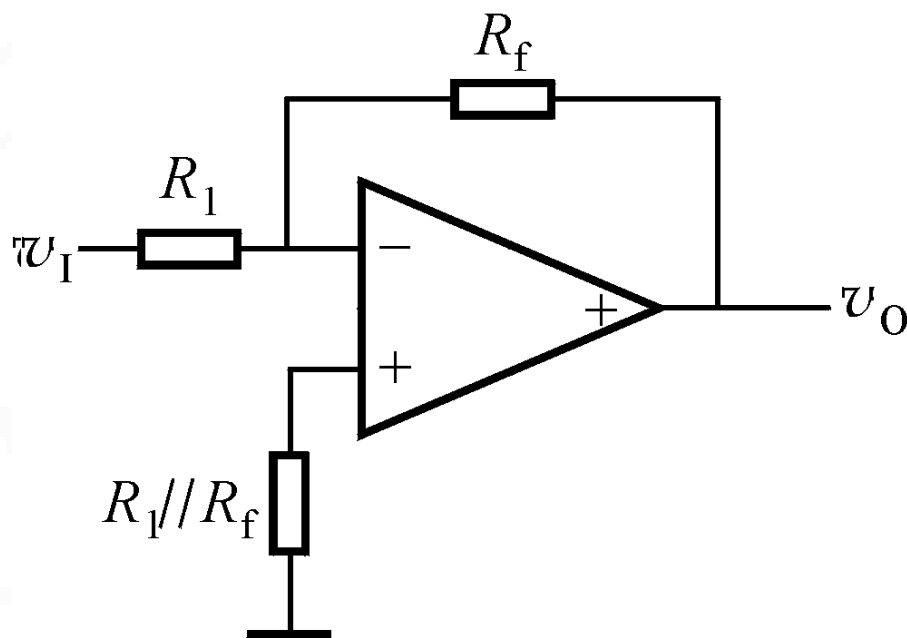
$$= -V_{IO} - \left[ (R_1 - R_2)I_{IB} + (R_1 + R_2)\frac{I_{IO}}{2} \right]$$

$$V_{OO} = A_{od} \cdot V_{Id} = -A_{od}V_{IO} - A_{od} \left[ (R_1 - R_2)I_{IB} + (R_1 + R_2)\frac{I_{IO}}{2} \right]$$

(1) 应选择  $R_1 = R_2$ 。  $R_1$ 、 $R_2$  称为输入平衡电阻（又称为平衡电阻或补偿电阻）。

(2)  $R_1$  和  $R_2$  越小，则  $I_{IO}$  对  $V_{OO}$  的影响也越少。因此，在实际使用时，要求运放两个输入端的外接平衡电阻相等且较小。

(3) 即使运放输入端短路，输出电压也可能进入饱和状态（例： $A_{od}=10^4$ ， $V_{IO}$ 为1.5mV，则 $V_{OO}$ 已达15V）。因此，集成运放在用作**线性放大**时必须接成**闭环方式**（即接成**负反馈**）。





### 3、集成运放的共模参数

#### (1) 共模抑制比 $K_{CMR}$

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right|$$

集成运放的共模抑制比一般在60dB以上，性能较好的运放在100dB以上。

#### (2) 最大共模输入电压 $V_{Ic(max)}$

当共模输入电压超出  $V_{Ic(max)}$  时，将影响运放电路中相关晶体管的工作状态。运放失去正常的差模放大能力。

#### (3) 共模输入电阻 $R_{ic}$

$$R_{ic} = \frac{\Delta v_{Ic}}{\Delta i_{Ic}}$$

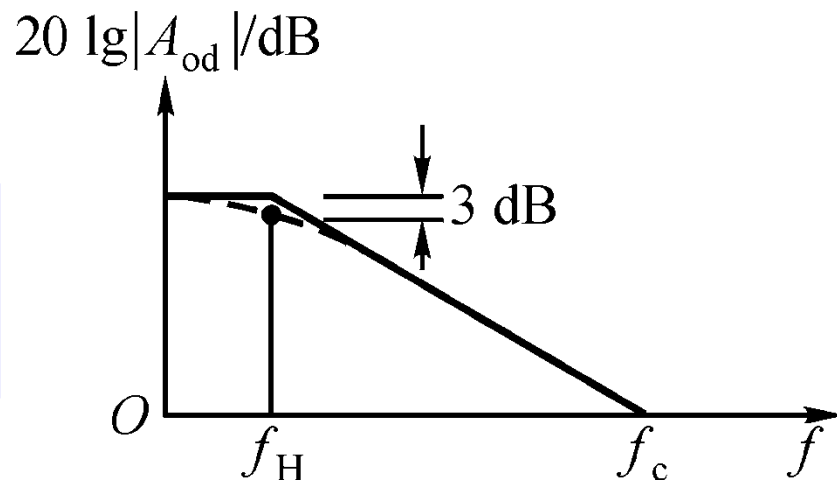


## 4、集成运放的时域和频域参数

### (1) -3dB带宽 $f_H$

$$BW = f_H - f_L = f_H$$

通用型运放的带宽 $f_H$ 仅为几赫兹至几十赫兹。



### (2) 单位增益带宽 $f_c$

指运放差模开环电压增益 $A_{vd}$ 下降至**0dB**时的频率。

$$f_c \approx A_{vd} \cdot f_H$$





### (3) 转换速率 SR (也称压摆率)

$$SR = \left| \frac{dv_o}{dt} \right|_{\max}$$

是衡量运放在大幅度信号作用下**工作速度**的参数。

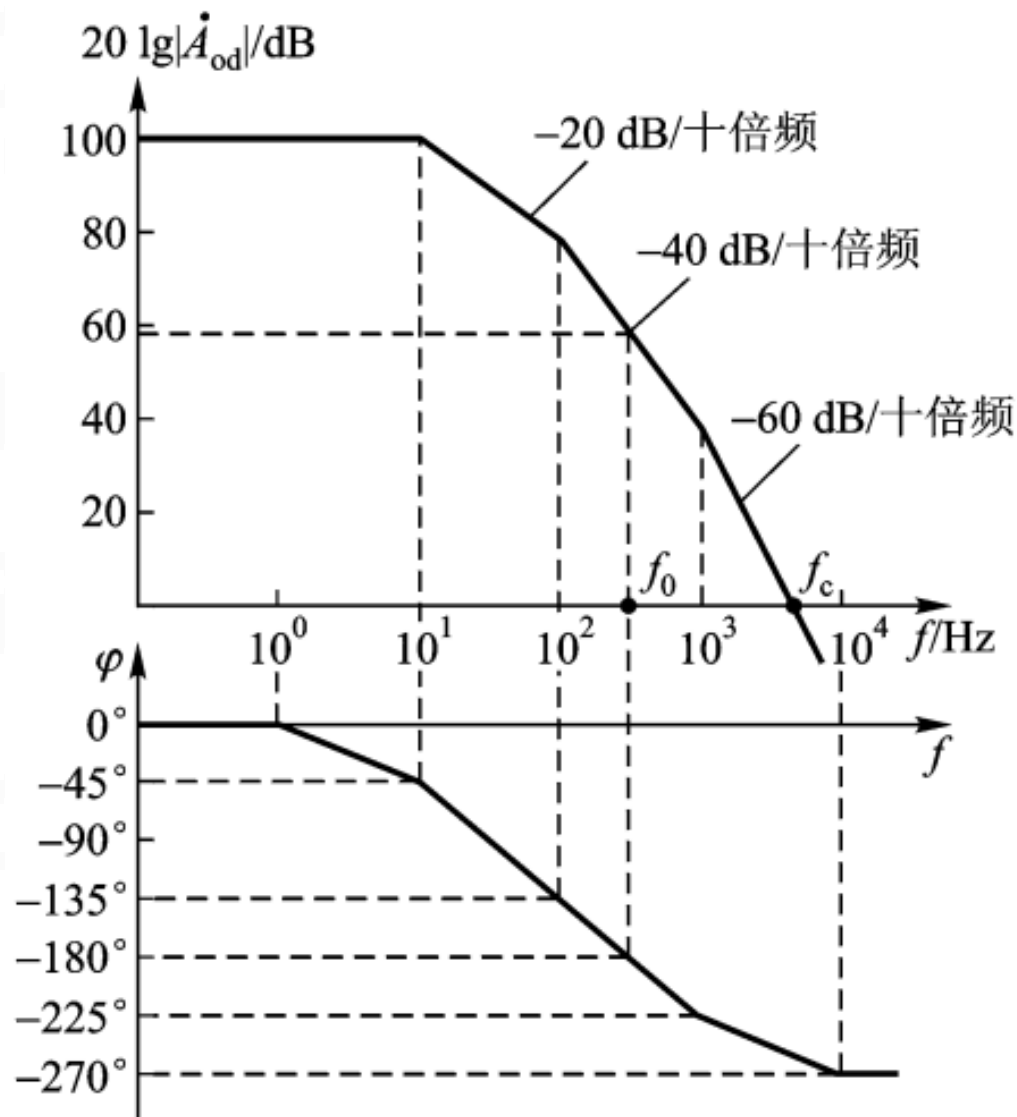
### (4) 全功率带宽 $f_p$

表示当运放输出较大幅度电压时，为保证输出波形不产生因SR为有限值而引起的波形失真，运放所能工作的最高频率。

## 四、集成运放的频率响应特性

✧ 集成运放是直接耦合多级放大电路，因此它的下限频率  $f_L = 0$ 。

✧ 由于集成运放的增益很大，而增益带宽积为常数，所以集成运放的带宽很窄，即上限频率很低。





## 五、集成运放应用时注意事项（自学）

### ➤ 运放类型

- ① **通用型**：其性能指标适合于一般性使用，产品量大面广。
- ② **低功耗型**：静态功耗在 $1\text{mW}$ 左右，可用于便携设备。
- ③ **高精度型**：失调电压温漂在 $1\mu\text{V}$ 以下。
- ④ **高速型**：转换速率在 $10\text{V}/\mu\text{s}$ 左右。
- ⑤ **高阻型**：输入电阻在 $10^{12}\Omega$ 左右。
- ⑥ **宽带型**：单位增益带宽在 $10\text{MHz}$ 左右



- ⑦ **高压型**：允许供电电压在 $\pm 30\text{V}$ 以上。
- ⑧ **功率型**：允许的供电电压较高可输出电流较大。
- ⑨ **跨导型**：输入量为电压，输出为电流。
- ⑩ **差分电流型**：输入为差分电流，输出为电压。
- ⑪ **轨对轨型**：普通运放的输入电压一般不超过 $\pm 10\text{V}$ （电源为 $\pm 15\text{V}$ 时），输出电压一般不超过 $\pm (12\sim 14)\text{V}$ 。而轨对轨（**Rail to Rail**）型集成运放的输入、输出电压范围可以达到电源电压值。
- ⑫ **其他**：如**程控型**、**电压跟随型**等。



## 本节重点提示:

- ✧ 能在较复杂的电路中认出电流源。
- ✧ 理解差分放大电路中差模共模叠加的原理及特点。
- ✧ 会画差模等效电路，会计算差模指标；会画共模等效电路，会计算共模指标。
- ✧ 了解互补对称共集电路及运放内部电路的形式（电路分析不要求）。
- ✧ 掌握运放的电压传输特性和三项基本参数；了解运放的其他参数（失调参数、共模参数、时域参数和频域参数）。



# 作业：

题1.14 （选做）

**题1.21**

**题1.23** （1、2）

**题1.24**

题1.25 （选做）

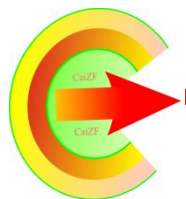
**题1.26**

题1.14 图中电位器 $R_w$ 为**51** k $\Omega$ 。

题1.21 图中电阻 $R_{b1}$ 为**10** k $\Omega$ 。



Thank you for your attention



蔡忠法

Ver3.5

浙江大学电工电子教学中心

版权所有©

2019年